O estágio pré-fulguração é observado em muitas mas não todas as fulgurações e consiste de emissões fracas e crescentes lentamente em H-α, raios-X moles e ondas de rádio centimétricas. A fase impulsiva é observada na maioria das fulgurações e consiste de abrilhantamentos rápidos e intensos em raios-X duros, H-α e ondas de rádio (e às vezes em luz branca e raios-gama), enquanto em raios-X moles é o período de aumento mais rápido no fluxo. A interpretação destes fenômenos exige energias dos elétrons (E) de 10 a 200 keV ou temperaturas dos elétrons de 1 a 20×10^8 K. Durante a fase principal, ou estendida, a fulguração atinge sua maior área e produção de energia. Neste estágio, o grosso da energia irradiada provém de um plasma moderadamente quente (1 a 3×10^7 K).

Enquanto que muitas fulgurações passam pelas três fases, existem muitas variações, por exemplo, com muitas passando sómente pela fase impulsiva. Em algumas fulgurações grandes, contudo, observações de raios-X duros, emissão de rádio e de partículas energéticas demonstram a presença prolongada de um número relativamente pequeno de elétrons e íons relativísticos (com velocidades de frações da velocidade da luz).

Na região do ultravioleta e ultravioleta extremo do espectro que cobre a faixa de ≈ 10 a ≈ 300 nm, as fulgurações explosivas têem características temporais semelhantes às explosões em raios-X duros e microondas indicando que são causadas pelos elétrons rápidos da fase impulsiva.

Em raras ocasiões as fulgurações produzem raios-gama. Comumente, mas não sempre, explosões em raios-gama são parte da fase impulsiva das fulgurações solares, as quais duram sómente uns poucos minutos, e estão intimamente relacionadas às explosões em raios-X e microondas.

Há uma estreita correlação entre os fluxos de pico e os perfís temporais de explosões em microondas e raios-X duros. As explosões freqüentemente iniciam com um precursor, um lento e relativamente fraco aumento no fluxo que começa poucos minutos antes do disparo da fulguração. O início da maioria das fulgurações é marcado pela fase impulsiva, na qual o fluxo aumenta rapidamente; pode variar abruptamente em uns poucos minutos, e então decai. O declínio é em princípio rápido, mas depois

freqüentemente evolui na fase de pós-explosão com decaimento lento e longo que pode durar de uns poucos minutos a uma hora. Nos eventos muito grandes, esta última fase é mascarada por outro fenômeno conhecido como explosão "extensa" na qual, após a fase impulsiva, o fluxo cresce lentamente outra vez e permanece alto, às vezes por mais de uma hora. Estas explosões são relativamente raras, mas importantes por causa da energia excepcionalmente alta das partículas envolvidas.

Os raios-X moles fornecem a maior parte da radiação da fulguração. O plasma que emite raios-X moles, com $T \approx 10^7$ K, carrega a maior parte da energia da fulguração na atmosfera solar mais baixa. Os raios-X moles incluem radiação no contínuo e linhas de emissão de elementos altamente ionizados como: oxigênio, cálcio e ferro. Numa fulguração típica os raios-X moles manifestam as três fases. É durante a fase impulsiva que aumenta mais rapidamente a temperatura do plasma de raios-X moles. Este plasma geralmente está confinado a uma ou mais configurações magnéticas ("loops" ou arcos magnéticos) situados próximo à linha neutra do campo magnético.

As explosões em ondas métricas surgem relativamente alto na coroa, geralmente fora das dependências da região ativa que é a origem de todos os processos de radiação considerados até agora. As explosões mais rápidas e mais primitivas, ocorrem durante a fase impulsiva da fulguração e estão relacionadas à passagem de feixes de elétrons sub-relativísticos (com velocidades de pequenas frações da velocidade da luz) através da coroa. As explosões tipo III e tipo V ocorrem dentro de poucos segundos a poucos minutos da fase impulsiva de uma fulguração. A velocidade com a qual a energia é transportada através da coroa é ~ 0,1-0,3 c, sugerindo transporte por elétrons energéticos. A explosão tipo V tem melhor correlação com explosões em microondas. Avanços nas instrumentações, com melhoria nas resoluções em tempo e em freqüência bem como aumento da sensibilidade, possibilitaram a detecção de explosões tipo III também na faixa de microondas (MacLean e Labrum, 1985).

Um segundo grupo mais lento de explosões (tipos II e IV) segue uns poucos minutos após a fase impulsiva e pode continuar por até cerca de uma hora. Estas explosões estão associadas com ondas de choque e movimentos de massa na coroa. As explosões tipo II e tipo IV dinâmica podem ocorrer separadamente ou em conjunto, neste caso, a explosão tipo II precede a tipo IV. Todas estas explosões são relativamente raras, talvez

uma ou duas por dia durante o período de máximo do ciclo de atividade solar (MacLean e Labrum, 1985).

O estágio final de uma fulguração, em comprimentos de onda métricos é a fase de tempestade que ocorre durante o decaimento da fulguração. É designada como "tempestade tipo I" e talvez sua designação mais simples seja de "fase tempestiva", consistindo num período de aumento de atividade que se inicia de algumas dezenas de minutos a uma hora após a fase impulsiva, e que pode durar por muitas horas ou mesmo dias. A fase de tempestade, pode ser devido a um rearranjamento natural dos campos magnéticos na coroa, após o surgimento de fluxo adicional na estrutura pré-existente de campo, como um resultado da passagem de uma ejeção de massa coronal e seus campos magnéticos associados (MacLean e Labrum, 1985).

4.14 IMPORTÂNCIA DAS PESQUISAS CIENTÍFICAS SOBRE O SOL

As atividades humanas estão cada vez mais dependentes de alta tecnologia. Por sua vez, os produtos dessa alta tecnologia são extremamente sensíveis à atividade solar e seus efeitos associados que podem atingir a Terra. Logo, as atividades humanas são direta ou indiretamente perturbadas pelos efeitos da atividade solar. Então, por questão de segurança, saúde e manutenção das atividades humanas, é muito importante a investigação científica das origens dos fenômenos solares explosivos e da atividade solar, e seus possíveis efeitos na Terra, com o intuito de minimizar os prejuízos que causam nas atividades humanas. Neste sentido, durante as últimas décadas, vários países têem criado programas para atender a sociedade em questões relacionadas ao clima espacial, e os efeitos causados no ambiente terrestre e nas atividades humanas pelos fenômenos que ocorrem no espaço extra-terrestre, principalmente, mas não exclusivamente, aqueles que ocorrem no Sol.

REFERÊNCIAS

Bhatnagar, A.; Livingston, W. World Scientific Series in Astronomy and Astrophysics Vol. 6 - **Fundamentals of Solar Astronomy.** Singapura: World Scientific Publishing Company, 2005.

Bishop Web Works. **Spaceweather.com.** [on-line]. <http://www.spaceweather.com>, 22/06/2001.

Bishop Web Works. **Sunspots and the solar cycle.** [on-line]. <http://www.sunspotcycle.com>, 22/06/2001.

Brekke, P.; Thompson, W.T.; Woods, T.N.; Eparvier, F.G. The extreme-ultraviolet solar irradiance spectrum observed with the Coronal Diagnostic Spectrometer (CDS) on SOHO. **The Astrophysical Journal**, Vol. 536, 959, 2000.

Burnell, S.J.B.; Green, S.F.; Jones, B.W.; Jones, M.H.; Lambourne, R.J.A.; Zarnecki, J.C. **An Introduction to the Sun and Stars.** Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

Charbonneau, P.; White, O. R.. **The sun: a pictorial introduction.** [on-line]. <http://www.hao.ucar.edu:80/public/slides/slides.html>, 22/06/2001.

Choudhuri, A.R. In: **Kodai School on Solar Physics (AIP Conference Proceedings 919),** Eds. Hasan, S.S. and Banerjee, D., pp. 49-73, 2007.

Curdt, W.; Brekke, P.; Feldman, U.; Wilhelm, K.; Dwivedi, B.N.; Schühle, U.; Lemaire, P. The SUMER spectral atlas of solar disk features. **Astronomy & Astrophysics**, Vol. 375, 591, 2001.

Dwivedi, B.N.; Parker, E.N. **Dynamic Sun.** Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

Gary, G.A. Plasma beta above a solar active region: rethinking the paradigm. **Solar Physics**, Vol. 203, 71, 2001.

Green, S. F.; Jones, M.H. **An Introduction to the Sun and Stars.** Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

Hathaway, D. H. **Solar physics.** [on-line]. <http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar>, 22/06/2001.

Kippenhahn, R. **Discovering secrets of the sun.** Chichester: John Wiley & Sins, 1994.

Komm, R.W.; Howard, R.F.; Harvey, J.W. Meridional Flow of Small Photospheric Magnetic Features. **Solar Physics,** Vol. 147, 207, 1993.

Kraus, J.D. **Radio Astronomy.** Powell: Cygnus-Quasar Books, 2nd ed., 1986.

Lang, K.R. **The Cambridge encyclopedia of the sun.** Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

MacLean, D.J.; Labrum, N.R. **Solar Radiophysics**, Cambridge University Press, 1985.

McCready, L.L; Pawsey, J.L.; Payne-Scott, R. In: **Proceedings of the Royal Society,** v. 190, pp. 357-375, 1947.

National Astronomical Observatory ROZHEN [on-line] <http://sob.nao-rozhen.org/content/basic-solar-parameters-and-information>, 27/04/2017.

Oliveira Filho, K. S.; Saraiva, M. F. O. **O Sol - a nossa estrela.** [on-line]. <http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>, 22/06/2001.

Pawsey, J.L.; Payne-Scott, R.; McCready, L.L. **Nature,** 157, 158, 1946.

Phillips, K.J.H. **Guide to the sun.** Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

Phillips, K.J.H.; Feldman, U.; Landi, E. **Ultraviolet and X-ray spectroscopy of the solar atmosphere.** Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

Stix, M. **The Sun – An Introduction.** Physics and Astronomy online library: Springer, 2004.

Svestka, K. **Solar Flares.** Dordrecht, D. Reidel, 1976, 400p.

Wild, J.P.; Smerd, S.F.; Weiss, A.A. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics,** Vol. 1, pp. 291-366, 1963.

Willson, R.F. VLA observations of solar active regions at closely spaced frequencies - Evidence for thermal cyclotron line emission. **The Astrophysical Journal**, Vol. 298, 911, 1985.

Zirin, H. **Astrophysics of the sun.** New York: Cambridge University Press, 1988.

<u>Capítulo 5</u>

FORMAÇÃO DE ESTRELAS

José Williams Vilas Boas

Revisão de junho/2007

E-mail: williams.boas@inpe.br

FORMAÇÃO DE ESTRELAS

Sumário

5.1. INTRODUÇÃO..4

5.2. ONDE NASCEM AS ESTRELAS?..5

5.3. ONDE ESTÃO AS NUVENS MOLECULARES. 8

5.4. COMO NASCEM AS ESTRELAS?...10

5.4.1. EMISSÃO DE CORPOS DE BAIXAS TEMPERATURAS...............................12

5.4.2. O COLAPSO DOS GLÓBULOS...14

5.4.2.1. MASSA CRÍTICA E TEMPO DE COLAPSO...16
5.4.2.2. QUAL O PAPEL DO CAMPO MAGNÉTICO NO COLAPSO?.................17
5.4.2.3. QUAL O PAPEL DAS SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS?.................................19

5.5. CONSEQUÊNCIAS DO NASCIMENTO DE UMA ESTRELA......................20

5.5.1. ESTRELAS MASSIVAS O E B (M DA ORDEM DE 10 MASSAS SOLARES)….21

5.5.2. ESTRELAS DE PEQUENA MASSA (M DA ORDEM DE 1 MASSA SOLAR) 23

5.5.3. ROTAÇÃO DAS NUVENS...24

5.6. BIBLIOGRAFIA...25

Lista de Figuras

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DA MOLÉCULA DE CO.

FIGURA 2 -DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS NUVENS MOLECULARES GALÁXIA, DETERMINADA A PARTIR DE CONTAGEM DE ESTRELAS (CAMBRÉSY ET AL. 1999)

FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO AQUECIMENTO DA REGIÃO CENTRAL DE UM GLÓBULO POR UMA ESTRELA EM SEUS ESTÁGIOS PRIMORDIAIS.

FIGURA 4 – IMAGENS ÓPTICA, INFRAVERMELHO E RÁDIO DO GLÓBULO COMETÁRIO VG33.

FIGURA 5 – REPRESENTAÇÕES FÍSICA (5A) E MATEMÁTICA (5B) DA COMPETIÇÃO ENTRE OS MECANISMOS QUE PODEM INIBIR OU DESENCADEAR O COLAPSO DE UM GLÓBULO.

FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS EVOLUTIVOS DO COLAPSO DE UM GLÓBULO.

FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS POSTERIORES AO NASCIMENTO DAS ESTRELAS.

5.1. INTRODUÇÃO

As tentativas mais antigas para explicar o que poderia ser uma estrela, datam de antes de Cristo. Como em outras áreas do conhecimento, a contribuição dos filósofos antigos para o entendimento do universo não poderia deixar de ser mencionada mesmo em relação a esse problema tão específico que é o nascimento de uma estrela. Abaixo seguem as idéias de alguns desses pensadores, as quais exibem uma profunda relação entre suas experiências com o mundo palpável e a suas capacidades de transcendência. Merece destaque o pensamento de Anaximandro (610 a.c.) segundo o qual "***O Sol e a Lua são anéis de fogo circundados pelo ar***" e de seu discípulo Anaximenes que propunha que "O ar é a substância básica da qual se originaram todas as coisas". Proposições apoiadas em conceitos mais abstratos também foram apresentadas, dentre as quais se destaca a proposta de Heráclito de que o Universo se equilibrava entre duas forças e que o fogo tinha primazia como agente de mudanças. Ele afirmava que o "Os corpos celestes são taças contendo fogo". Outras propostas, invocando a idéia de um criador, foi apresentada por Anáxagora (476 a.c.) e sugeria que "No princípio o Universo era uma mistura uniforme sem movimento. A "mente" entrou em ação e fez com que todo o sistema girasse; no vórtice resultante a matéria fria, densa e escura ficou no centro, dando origem à Terra, enquanto toda a matéria quente, seca e rarefeita era expulsa. O Sol, e a Lua foram arrancados da Terra e aquecidos por fricção enquanto giravam no redemoinho de matéria". Ainda antes de Cristo, Empedocles tentou interpretar o Universo como sendo composto dos elementos básicos do mundo (terra, ar, água e fogo) mais uma força de atração (***amor***) e uma força de repulsão (***ódio***).

Antes de partir para as idéias que surgiram durante o Renascimento, após um longo período de estagnação do pensamento humano sobre o universo, vale a pena mencionar o pensamento do chinês Chi Meng (25 a 250 d.c.), segundo o qual "O céu era vazio e sem substância...não tendo fronteiras. O Sol e a Lua e as estrelas flutuavam no espaço". Essa é uma concepção bastante avançada do Universo e uma das ultimas de que se tem conhecimento após a humanidade mergulhar na Idade Média. Mesmo assim ela, como algumas outras, não discute a natureza das estrelas.

Finalmente, **Laplace** (1749-1827) propôs que o Sistema Solar nasceu de uma nuvem de gás primitiva em rotação (Nebulosa Solar). Esse modelo estabeleceu a relação definitiva, comprovada posteriormente, entre o nascimento de uma estrela e uma nuvem de gás progenitora. Devido à similaridade entre as proposições, vale a pena mencionar o pensamento dos filósofos pré-socráticos Anaximandro e Anaximenes (~600 a.c.) segundo os quais "A Terra e todo corpo material se formaram da condensação de uma massa de ar giratória".

Dessa forma, surge a seguinte questão***:***

***Se as estrelas se formaram de uma nuvem progenitora, onde está essa nuvem ou o que restou dela*?**

***Todas as estrelas já estão formadas ou ainda existem estrelas se formando*?**

5.2. ONDE NASCEM AS ESTRELAS?

Parece simples a idéia de Laplace de que uma estrela tem como progenitora uma nuvem de gás. Hoje essa idéia é bem aceita, mas para que isso acontecesse houve uma discussão relacionada com a existência dessas nuvens, que se arrastou por centenas de anos. Embora fosse fácil ver as estrelas devido a seus brilhos intensos, não era fácil observar as nuvens de gás e provar que as estrelas nasciam dentro delas.

A primeira observação direta dessas nuvens foi feita por John Hartman em 1904. Ele observou linhas espectrais na direção de muitas estrelas as quais não pareciam se originarem nas estrelas. Apesar dessa descoberta, sugerir a existência de um gás no espaço interestelar, somente 18 anos mais tarde é que a comunidade científica aceitou a hipótese de que essas emissões poderiam ser geradas em uma nuvem de gás localizada na vizinhança das estrelas. Descartavam totalmente a hipótese de que essas linhas poderiam ter sido geradas em uma nuvem de gás localizada entre o sistema solar e as estrelas que estavam sendo observadas. Apenas no início da década de 60 é que essa questão foi definitivamente resolvida. Nessa época, vários átomos e moléculas simples

(H, H+, Na, Ca, CH, CH+, e CN) tinham sido observados no espaço entre as estrelas, consolidando definitivamente a hipótese de que as nuvens interestelares realmente existiam. Dentre essas substâncias, as observações de Hidrogênio mostraram que não só existiam nuvens interestelares, como também um gás tênue preenchendo quase toda a Galáxia.

Com esse resultado, a comunidade científica não tinha com duvidar da existência dessas nuvens. Mesmo assim, ainda argumentavam que elas não poderiam ser densas o suficiente para conter moléculas complexas, poli-atômicas. Essa hipótese também foi descartada ainda no final da década de 60, quando cientistas da universidade de Berkley, California, observaram emissões das moléculas de água (H_2O) e amônia (NH_3) em nuvens de gás localizadas na direção do centro de nossa Galáxia, provando assim que nessas nuvens existiam moléculas poliatômicas. Finalmente, foi estabelecido que as nuvens interestelares, realmente existiam.

Com o grande progresso tecnológico da microeletrônica a partir da década de 60, ocorreu uma evolução considerável no conhecimento das nuvens moleculares. Para se ter uma idéia desse progresso, da década de 70 até os dias de hoje, foram descobertas mais de 110 moléculas nessas nuvens interestelares, algumas muito simples contendo dois átomos, até aquelas mais complexas contendo mais de 15 átomos (Tabela I). Moléculas ainda maiores foram descobertas recentemente sob a forma de grãos sólidos contendo várias dezenas de átomos, denominadas Hidrocarbonetos Poli-Aromáticos (HPA).

Para que algumas dessas moléculas sejam formadas, são necessárias regiões com densidades muito altas ($10^{6..7}$ cm^{-3}), indicando que essas nuvens não são objetos de densidade homogênea.

Agora, conhecendo com mais detalhe a constituição das nuvens interestelares, pode-se retornar às hipóteses de Laplace e dos pré-socráticos Anaximandro e Anaximenes, e procurar em nossa Galáxia as nuvens moleculares para verificar se as estrelas realmente nascem dentro delas e como se dá esse processo.

TABELA I - MOLÉCULAS INTERESTELARES E CIRCUNSTELARES IDENTIFICADAS

H_2(IV)		NH_3	CS	NaCl*
HCl	SiO	SiH_4* (IV)	SiS	AlCl*
	SO_2	C_2 (IV)	H_2S	KCl
N_2O	OCS	CH_4	PN	AlF*
HF				

Nitrilos e derivados de Acetileno.

C_3 (IV, UV)	HCN	CH_3CN	HCN	C2H_4 (IV)
C_5 (IV)	HC_3N	CH_3C_3N		C_2H_2 (IV)
C_3O	HC_5N	CH_3C_5N	HNCS	
C_3S	HC_7N	CH_3C_2H	HNCCC	
	$HC_{11}N$	CH_3CH2CN	HCCNC	
	HC_2CHO	CH_3CHCN		

Aldeídos, Álcool, Esteres, Acetonas, Amidos e moléculas relacionadas.

H_2CO			CH_2NH	CH_2CC
H_2CS		$HCOOCH_3$	CH_2NH_2	CH_2CCC
	CH_3SH	$(CH_3)_2O$	NH2CN	
NH_2CHO	$(CH_3)_2CO$	H_2CCO	CH_3COOH	

Moléculas Cíclicas

C_3H_2	SiC_2	c-C_3H	CH_2OCH_2	

Ions Moleculares

CH^+ (VIS)	HCO^+	$HCNH^+$	H_3O^+	HN_2^+
HCS^+	$HOCO^+$	HC_3NH^+	HOC^+	H_3^+ (IV)
CO^+	H_2COH^+	SO^+		

Radicais

OH	C_2H	CN	C_2O	C_2S
CH	C_3H	C_3N	NO	NS
CH_2	C_4H	HCCN*	SO	SiC*
NH (UV)	C_5H	CH_2CN	HCO	SiN*
NH_2	C_6H	CH_2N	MgNC	CP*
HNO	C_7H	NaCN	MgCN	
C_6H_2	C_8H	C_5N		

NOTAS. O (*) SIGNIFICA QUE A SUBSTÂNCIA QUÍMICA FOI OBSERVADA NO ENVOLTÓRIO DE GÁS DE UMA ESTRELA. IV, UV E VIS SIGNIFICA QUE ESSAS SUBSTÂNCIAS FORAM OBSERVADAS ATRAVÉS DE SUAS EMISSÕES NO INFRAVERMELHO, ULTRAVIOLETA E VISÍVEL. TODAS AS OUTRAS FORAM OBSERVADAS ATRAVÉS DE SUAS EMISSÕES EM ONDAS DE RÁDIO. EM NEGRITO ESTÃO INDICADAS ALGUMAS MOLÉCULAS OBSERVADAS EM GELOS.

5.3. ONDE ESTÃO AS NUVENS MOLECULARES.

Dentre as várias moléculas listadas na tabela I, o monóxido de carbono (CO) foi uma das mais utilizadas para se estudar as nuvens moleculares distribuídas em nossa galáxia. Essa molécula é importante porque é muito abundante nas nuvens de gás e emite radiação em regiões de baixíssimas temperaturas (~ 50 K ou –223 ^{0}C) com densidades típicas das nuvens interestelares (! 10^2 cm^{-3}). Embora a densidade dessas nuvens seja muito baixa, se comparada à densidade da atmosfera na superfície da Terra (>10^{18} cm^{-3}), ela é alta se comparada com muitas regiões de nossa galáxia, onde a densidade é inferior a uma partícula por centímetro cúbico.

A Figura 1 mostra a representação espacial da molécula de CO. Da mesma forma que os elétrons, toda vez que uma molécula salta de um nível superior de energia para um nível inferior ela emite radiação. O pulo da molécula de CO do segundo para o primeiro nível de energia, gera radiação em comprimentos de onda de rádio, que tem a característica de se propagar nos meios mais variados sem sofrer muita interferência.

Na Figura 2 é mostrada a distribuição das nuvens moleculares na nossa galáxia como visto do Sistema Solar. Essas nuvens podem ser subdivididas em dois grandes grupos, que recebem o nome de **nuvens moleculares gigantes** e **nuvens escuras**. As nuvens moleculares gigantes têm massas maiores do que 10 milhões de massas solares e as nuvens escuras têm massas da ordem de até mil massas solares. Essas nuvens menores recebem essa denominação porque quando observadas em comprimentos de onda do visível, aparecem na Via Láctea como manchas escuras. Elas são escuras porque são nuvens próximas do Sistema Solar (distância típicas menores que 1200 anos-luz) e absorvem a radiação das estrelas que estão por trás delas. Os primeiros relatos científicos sobre a existência dessas nuvens foram escritos por William Hershel em 1780. No entanto, a sua hipótese para explicar as manchas escuras contra o fundo brilhante da Via Láctea, sugeria que se estava observando através de buracos na Galáxia. Um bom exemplo desse efeito é a nuvem escura conhecida como Saco de Carvão, que pode ser observada em uma noite de céu claro ao lado do Cruzeiro do Sul.

Diversas nuvens escuras podem ser vistas ao longo da Via Láctea em uma noite de céu limpo e sem Lua.

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DA MOLÉCULA DE CO.

Um grande número de nuvens moleculares foi identificado em nossa galáxia. Devido à sua grande variedade de formas (circulares, irregulares, filamentares etc), localização na Galáxia, temperaturas e densidades, elas têm sido classificadas em vários tipos diferentes que se distribuem entre as duas classes de nuvens definidas anteriormente.

FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS NUVENS MOLECULARES NA GALÁXIA, DETERMINADA A PARTIR DE CONTAGEM DE ESTRELAS (CAMBRÉSY ET AL. 1999)

Um aspecto interessante é que apenas as nuvens moleculares gigantes formam estrelas de grande massa. As nuvens escuras, embora tenham massa até 100 vezes maiores do que as estrelas gigantes tipo O e B, não mostram qualquer evidência de que estrelas como essas estejam se formando em seu interior. Elas formam apenas estrelas de pequena massa.

Em nossa galáxia, as nuvens moleculares gigantes estão praticamente distribuídas em seus braços, razão pela qual, as maiorias das estrelas de grandes massas também estão nos braços.

5.4. COMO NASCEM AS ESTRELAS?

Apesar de se ter disponível, já no início da década de 80, uma grande quantidade de informação sobre as nuvens interestelares, e também terem sido observadas centenas de estrelas O e B jovens embebidas em nuvens moleculares, pouco se sabia dos estágios primordiais da formação das estrelas. Aqueles estágios em que as regiões mais densas

de uma nuvem, por algum motivo, colapsam sobre si mesmas produzindo temperaturas tão altas em seus núcleos, capazes de desencadear as reações nucleares necessárias para o nascimento de uma estrela.
Somente em 1986 é que foi finalmente estabelecido, com base em resultados observacionais, que as estrelas nascem em condensações de altas densidades em nuvens moleculares. Devido à sua aparência, na maioria das vezes circular essas condensações foram denominadas de Glóbulos. A primeira hipótese de que as estrelas nasciam nos glóbulos foi proposta por Baad em 1944. Três anos depois, ela foi bastante discutida por Bock e Reily (1947) e finalmente por Debai (1953), que apresentaram argumentos convincentes de que essa hipótese era verdadeira. Em homenagem a Bock, essas regiões passaram a ser denominadas Glóbulos de Bock.

Como esses glóbulos são regiões de altas densidades, eles sempre aparecem como objetos escuros quando observados em comprimentos de onda do visível. Mesmo uma estrela, que é um corpo celeste de alta temperatura e que emite muita radiação no visível, em seus estágios primordiais de formação não pode ser observada nesses comprimentos de onda. Isso porque o glóbulo progenitor absorve toda a radiação gerada pela estrela. Como mostra a figura 3, a estrela aquece o gás em sua vizinhança que por sua vez começa a emitir radiação como um corpo de baixa temperatura.

FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO AQUECIMENTO DA REGIÃO CENTRAL DE UM GLÓBULO POR UMA ESTRELA EM SEUS ESTÁGIOS PRIMORDIAIS.

5.4.1. EMISSÃO DE CORPOS DE BAIXAS TEMPERATURAS.

Um das principais características dos corpos com baixas temperaturas é que eles emitem radiação em comprimentos de onda grandes, ou seja, baixas freqüências. Essa propriedade dos corpos é muito bem descrita pela teoria de Planck. Os corpos com temperaturas superficiais muito altas emitem quase que toda sua radiação no intervalo de energia que vai do ultravioleta ao visível. Esse é o caso das estrelas gigantes azuis jovens, cujas temperaturas na superfície são superiores a 3 x 10^4 K. Todavia, nos estágios primordiais de formação estelar a maior parte da emissão proveniente dos glóbulos é produzida pelo gás e a poeira aquecidos a temperaturas de 10 a 100 K. Conseqüentemente, grande parte da energia desses corpos frios é emitida em

comprimentos de onda no infravermelho. Como a radiação nessas freqüências é absorvida pela atmosfera terrestre, exceto em algumas bandas muito estreitas (Ver Cap 2, Apostila), pode-se concluir que não seria fácil observar as estrelas recém-nascidas no interior dos glóbulos. É por esse motivo que as estrelas, em seus estágios primordiais de formação, só foram identificadas no interior dos glóbulos de Bock depois das observações do Satélite IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) em comprimentos de onda do infravermelho (12 μm, 25 μm, 60 μm, 100 μm).

A figura 4 mostra a imagem de um glóbulo quando observado no visível, no infravermelho distante e através da emissão de uma variedade isotópica da molécula de monóxido de carbono. Observe que os máximos da emissão de $^{12}C^{18}O$ (J=1-0) ocorre exatamente na região onde o glóbulo praticamente não emite radiação no visível. O mesmo parece ocorrer com a emissão no infravermelho distante (100 μm), embora ele esteja um pouco deslocado para a borda do glóbulo no visível.

FIGURA 4 – IMAGENS ÓPTICA, INFRAVERMELHO E RÁDIO DO GLÓBULO COMETÁRIO VG33. A IMAGEM ÓPTICA É UMA COMPOSIÇÃO DE IMAGENS OBTIDAS EM HA E SII (REIPUTH, 1997) E A IMAGEM DE RADIO É A EMISSÃO DE $C^{18}O$ (HICKEL E VILAS-BOAS, 2001)

5.4.2. O COLAPSO DOS GLÓBULOS

Com base nos argumentos apresentados, é possível elaborar um quadro simplificado para entender os mecanismos responsáveis pelo colapso dos glóbulos e finalmente discutir quais os fatores que influenciam esse processo. Na tentativa de elaborar esse quadro e dele obter informações relevantes sobre a história do colapso, é necessário utilizar hipóteses de trabalho que simplifiquem a abordagem do problema e forneçam informações básicas sobre os mecanismos responsáveis pelo colapso.

Vamos imaginar um glóbulo esférico, com distribuição de massa uniforme, temperatura constante e destituído de movimento de rotação. Sabemos da teoria da Gravitação Universal de Newton, que os corpos se atraem com uma força que depende de suas massas e da distância entre elas. Essa é a força que atrai os corpos para o centro da Terra e que é responsável pela queda de todos eles. Se a superfície da Terra não fosse sólida, os corpos em queda livre poderiam chegar muito mais próximos do seu centro. Logo, como base apenas nessa experiência é possível dizer, fazendo uma perfeita analogia com a Terra, que todas as partes do glóbulo estão sendo atraídas para o seu centro. Como se trata de um objeto gasoso, todo o gás deve caminhar na direção do centro, a menos que algum outro fator impeça esse movimento. E isso realmente acontece quando as partículas em queda livre aproximam-se umas das outras a ponto de colidirem. As colisões fazem com que parte da energia cinética das partículas em queda se converta em calor, aumentando apreciavelmente a temperatura no centro do glóbulo. A conseqüência natural desse processo é o surgimento de uma força de dentro para fora, de modo semelhante ao que acontece com uma panela de pressão, podendo impedir o colapso das regiões centrais. Quanto mais gás cai para o centro do glóbulo, maior a temperatura central e maior a reação ao colapso.

Usando-se um pouco mais da nossa capacidade de abstração, seria possível incluir alguns outros elementos de nossa vida cotidiana nesse modelo. Sabemos que o glóbulo encontra-se em uma nuvem de gás mais extensa e de densidade menor. E o simples fato dele estar imerso nessa nuvem sugere que sua superfície pode sofrer a ação de uma pressão externa. Outro aspecto interessante resulta das observações de que no Sistema Solar os planetas e o próprio Sol, que é uma estrela de massa pequena, apresentam

movimento de rotação. Finalmente, um aspecto mais sutil está relacionado com o fato de que a Terra, o Sol e vários outros corpos celestes, inclusive a própria galáxia, têm campos magnéticos associados.

Dessa forma, é possível ampliar o modelo anterior levando-se em consideração esses aspectos. Uma representação esquemática está mostrada na figura 5. Em (A) é mostrada a física do problema e em (B) a sua representação matemática.

FIGURA 5 – REPRESENTAÇÕES FÍSICA (5A) E MATEMÁTICA (5B) DA COMPETIÇÃO ENTRE OS MECANISMOS QUE PODEM INIBIR OU DESENCADEAR O COLAPSO DE UM GLÓBULO. EM (B) ESTÃO ESCRITAS AS EQUAÇÕES DA HIDRODINÂMICA QUE PODEM DESCREVER A EVOLUÇÃO DO COLAPSO DE UM GLÓBULO.

Como mostra a figura, o problema consiste de uma competição entre a atração **gravitacional (F_G),** o **aquecimento interno (F_{PI}),** a **pressão externa (F_{PE}),** o **campo magnético (F_B)** e o **movimento de rotação (F_{ROT}).** O que pode ser escrito matematicamente como

$$(F_G + F_{PE})=(F_B + F_{PI} + F_{ROT})$$

Na análise que é feita a seguir, apenas para simplificar o entendimento do problema, serão desprezados os efeitos da pressão externa e da rotação. Apenas no final do texto a rotação será considerada, com ênfase no seu papel para explicar porque algumas estrelas não giram com a velocidade esperada ou giram no sentido invertido.

5.4.2.1. MASSA CRÍTICA E TEMPO DE COLAPSO

Se a força gravitacional for maior do que a repulsão interna, o colapso será inevitável, resultando em uma estrela jovem. Se a repulsão interna for maior do que a atração, o glóbulo irá se desfazer. No entanto se a atração e a repulsão forem iguais o glóbulo não sofrerá qualquer alteração e permanecerá nesse estado de equilíbrio.

A partir das equações da cinemática de Newton,

$$V = Vo + a\ t$$
$$V^2 = V_o^2 + 2\ a\ R$$
$$R = V_o\ t + ½\ a\ t^2$$

Onde, **V** é a velocidade, $a=GM/R^2$ é a aceleração da gravidade, **R** é a distância ao centro do glóbulo, **M** a massa do glóbulo e **G** a constante de gravitação universal e assumindo que no centro do glóbulo a energia das partículas do gás em queda livre é convertida em temperatura ($½\ m\ v^2 = 1.5\ k\ T$), é possível mostrar que se a temperatura interna e a densidade de um glóbulo são **T** e ρ respectivamente, então existe uma massa crítica a partir da qual o glóbulo colapsa, dada por

$$\mathbf{M_{CRIT}\ \alpha\ T^{3/2} / \rho^{1/2}}$$

Ainda usando essas equações simples da cinemática, é possível obter uma relação entre o tempo de colapso do glóbulo e sua densidade.

$$\mathbf{t_{colapso}\ \alpha\ \rho^{-1/2}}$$

Esses resultados mostram que quanto maior a temperatura no centro dos glóbulos maiores serão as massas necessárias para desencadear o colapso. Outro aspecto interessante, é que, tanto maiores serão as densidade centrais quanto maiores forem às massas dos glóbulos. Logo, o colapso para formar estrelas de massas grandes (estrelas tipo O) ocorre numa escala de tempo menor do que as estrelas de massas pequenas (o nosso Sol).

Uma estimativa mais rigorosa da Massa Crítica, também denominada massa de Jeans, e do tempo de colapso pode ser feita a partir das equações da hidrodinâmica fornecidas na figura 5B. Para resolvê-la em primeira aproximação, usa-se o método das perturbações. Resultados similares aos obtidos anteriormente também são obtidos com esse procedimento bem mais rigoroso. Ele tem a vantagem de poder explorar em detalhes todo o processo do colapso, usando-se métodos computacionais.

5.4.2.2. QUAL O PAPEL DO CAMPO MAGNÉTICO NO COLAPSO?

Embora os glóbulos sejam densos e absorvam praticamente toda a radiação em suas camadas externas, algumas partículas de altas energias vindas do Cosmo (raios cósmicos) conseguem penetrá-los, ionizando uma pequena quantidade de matéria. Essa matéria ionizada é suficiente para mudar apreciavelmente a história do colapso. Isso porque as partículas carregadas sofrem uma influência muito forte do campo magnético. Quando as cargas em seu movimento de colapso cruzam perpendicularmente o campo, elas tendem a arrastá-lo. Isto não acontece quando elas seguem ao longo do campo.

Nessa direção, elas se movem sem sofrer qualquer interação com ele. É essa maneira diferente das partículas ionizadas interagirem com o campo magnético que acaba influenciando o quadro evolutivo do colapso. Uma situação interessante é aquela em que o campo é tão forte que ele se opõe ao movimento das partículas carregadas, inibindo completamente o colapso. Embora isso possa acontecer, o campo magnético apresenta um comportamento muito interessante: ao longo do tempo ele tende a voltar à configuração que ele tinha antes do início do colapso. Isso faz com que, transcorrido certo tempo (tempo de **difusão ambipolar**), o campo magnético deixe o glóbulo gradativamente, permitindo que as regiões centrais comecem a colapsar. Isto é, o núcleo do glóbulo entra em colapso primeiro e posteriormente as partes mais externas. Esse tipo de colapso cria uma região rarefeita entre o núcleo denso e a borda interna envelope de gás que continua caindo para o centro. Tudo se passa como se esse anel de rarefação estivesse se propagando de dentro para fora. Esse tipo de colapso é denominado **colapso de dentro para fora**.

O colapso que ocorre sem a ação de qualquer mecanismo externo, é denominado de ***colapso espontâneo***.

Na figura 6, é mostrada uma representação esquemática do problema. Em 6A é mostrada a nuvem molecular, o glóbulo e as linhas de campo magnético. Em 6B as linhas de campo estão distorcidas dentro dos glóbulos porque os íons que participam do colapso e se movem perpendicularmente ao campo magnético, arrastam o campo consigo. Observe que ao longo do campo o gás cai livremente, o que não acontece nas direções perpendiculares. Conseqüentemente, o que antes era uma esfera de gás se transforma em algo com a forma de disco, como mostram as figuras 6 B e C. Essa geometria também é favorecida pela rotação.

FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS EVOLUTIVOS DO COLAPSO DE UM GLÓBULO. (A) REPRESENTA O ESTADO INICIAL DO COLAPSO. O GLÓBULO AINDA É ESFÉRICO E AS LINHAS DO CAMPO MAGNÉTICO SÃO PARALELAS. ISTO É, O CAMPO É UNIFORME. EM (B) O COLAPSO EVOLUIU E AS LINHAS DE CAMPO FORAM ARRASTADAS PELO GÁS EM QUEDA LIVRE E A GEOMETRIA DA NUVEM TENDE PARA UM DISCO (ELIPSÓIDE OBLATO). EM (C) O COLAPSO DO NÚCLEO JÁ OCORREU E UMA ESTRELA JOVEM ENCONTRA-SE NO CENTRO DO GLÓBULO.

5.4.2.3. QUAL O PAPEL DAS SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS?

Embora a composição química não pareça ter qualquer influência no colapso, ela realmente tem. Numa situação em que a temperatura interna do glóbulo gera uma pressão que estabelece o equilíbrio com a atração gravitacional, a presença das moléculas e átomos pode desequilibrar o sistema. Dentre essas moléculas, merecem destaque H_2O, CO, H_2 além de outras.

Como discutido anteriormente, a queda do gás para o centro da nuvem é o principal responsável pelo aquecimento do centro do glóbulo. Esse aquecimento resulta da

colisão entre as partículas do gás. Essas colisões fazem com que as moléculas ou átomos saltem para níveis de energia mais altos e posteriormente voltem para seus estados inicias. Nesse processo, elas emitem radiação que deixa a nuvem e se propaga em todas as direções, carregando uma pequena porção do calor interno do glóbulo. Em outras palavras, elas agem como refrigeradores do núcleo. Como muitas moléculas e átomos estão envolvidos nesse processo, uma fração apreciável do calor interno do glóbulo é jogada para fora, diminuindo sua temperatura interna. Consequentemente, também diminui a pressão interna do glóbulo e a força que equilibra a atração gravitacional. Quando a diminuição dessa força é suficientemente grande, todo o glóbulo inicia um novo colapso.

O colapso resulta em um grande aquecimento do centro do glóbulo. Esse aquecimento é tal que 4 átomos de hidrogênio se fundem dando origem a um átomo de **He**. Quando isso ocorre, por definição nasce uma estrela. A principal característica desse processo de fusão é que parte da massa dos 4 átomos de **H** se transforma em energia ($E=mc^2$), sendo esse um dos principais processos de produção de energia nas estrelas (Ver Cap 4 da Apostila) .

5.5. CONSEQUÊNCIAS DO NASCIMENTO DE UMA ESTRELA.

Como mencionado no item anterior, o colapso resulta em aquecimento do núcleo dos glóbulos e finalmente no nascimento de uma estrela. A principal característica de uma estrela é que ela é uma intensa fonte de radiação. Tanto mais intensa ela será quanto maior for a sua massa. Com base nessa informação, pode-se concluir que as estrelas tipo O (gigantes azuis com massas >10 Massas do Sol) são muito mais brilhantes do que estrelas como o Sol que é uma anã tipo G. Devido às altas temperaturas de suas superfícies (>30000 C) as estrelas de grande massa produzem radiação ($>10^{48}$ fótons ionizantes) com energia suficiente para dissociar completamente uma grande quantidade de gás em torno das estrelas recém-nascidas. Como as estrelas de massa pequena, como o nosso Sol, produzem pouca radiação com essas características, elas não são capazes de ionizar o gás em sua vizinhança a ponto de criar uma grande bolha de gás ionizado.

Levando-se em consideração apenas essa característica, é possível concluir que as primeiras evidências do nascimento de um "bebê" estrela variam em função de suas massas.

5.5.1. ESTRELAS MASSIVAS O E B (M DA ORDEM DE 10 MASSAS SOLARES)

Ao nascerem, as estrelas de grande massa (10 massas solares ou mais) criam em torno de si uma bolha de gás totalmente ionizado, inicialmente pequena, e que se expande continuamente criando uma onda de choque na região que delimita a bolha ionizada e o gás externo. Essa bolha pode se expandir consumindo completamente o glóbulo progenitor, podendo inclusive ionizar toda a nuvem de gás. Um aspecto interessante desse quadro evolutivo é que a frente de choque, propagando-se ao longo da nuvem, tem a propriedade de comprimir o gás que encontra em seu caminho. Se essa frente encontra um glóbulo, ela aumenta a pressão externa ($\mathbf{F_{PE}}$) do ambiente onde ele se encontra. O aumento da pressão pode desequilibrar os glóbulos induzindo a formação de novas estrelas. Esse mecanismo parece ser um dos principais responsáveis pela formação de estrelas de grandes massas e tem sido amplamente utilizado para explicar associações de estrelas de grande massa que apresentam gradientes de idades. Ele é denominado de ***Formação Induzida*** ou ***Formação Seqüencial de Estrelas***.

A figura 7 (A) mostra o "bebê" estrela e a bolha de gás ionizado que se expande na direção do disco, bem como na direção perpendicular. Observe que a direção perpendicular é a direção do campo magnético. A expansão da bolha de gás ionizado ao longo do plano do disco é mais difícil do que na direção perpendicular. Isso porque a densidade do disco é muito alta e também porque o gás ionizado tem que se mover perpendicularmente ao campo magnético. Como se discutiu anteriormente, o campo magnético se opõe ao movimento de cargas elétricas nessa direção. Esse efeito tem menor importância quando a estrela é muito brilhante e a energia injetada no gás ionizado é muito alta. Embora o disco e o campo magnético ofereçam resistência à expansão dessa bolha de alta energia, ela acaba destruindo o disco e o próprio glóbulo.

E tudo isso numa escala de tempo muito curto ($<10^5$ anos). Embora essas estrelas, durante sua fase “pré-natal”, estejam completamente embebidas em um “casulo” muito denso (glóbulo), elas anunciam a sua existência criando um forte jato de gás que escapa do núcleo do casulo na direção perpendicular ao disco. Uma vez que toda essa atividade pode ocorrer no período compreendido entre as “últimas semanas de gestação” e os primeiros dias de vida das estrelas, esses jatos podem ser vistos como o primeiro “choro” do bebê estrela.

FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ESTÁGIOS POSTERIORES AO NASCIMENTO DAS ESTRELAS. EM (A) É MOSTRADA A BOLHA DE GÁS IONIZADO (REGIÃO HII COMPACTA) CRIADA POR UMA ESTRELA DE GRANDE MASSA (O,B) EXPANDINDO-SE AO LONGO DO DISCO E NAS DIREÇÕES PERPENDICULARES. A FRENTE DA BOLHA IONIZADA É MARCADA PELA PRESENÇA DE UM CHOQUE SUPERSÔNICO E UM INTENSO CAMPO DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA. EM (B) É

MOSTRADA A EVOLUÇÃO DA BOLHA DE GÁS AQUECIDO QUE SE FORMA EM TORNO DA ESTRELA DE MASSA PEQUENA. É MOSTRADA A INTERAÇÃO DO JATO PERPENDICULAR AO DISCO COM AS NUVENS MOLECULARES VIZINHAS.

5.5.2. ESTRELAS DE PEQUENA MASSA (M DA ORDEM DE 1 MASSA SOLAR)

As estrelas de pequena massa se formam de maneira similar às estrelas de grande massa. As principais diferenças no processo de formação de ambas estão relacionadas principalmente com seus estágios finais de "gestação". Enquanto as estrelas muito brilhantes, de grande massa, nascem e podem destruir completamente o glóbulo progenitor, as estrelas de massa pequena não. Por esse motivo, os efeitos do nascimento desse "bebê" estrela sobre o meio ficam determinados pelas características da própria estrela mais as condições impostas pelo meio em que ela se forma. Isto é, da mesma forma que uma estrela de grande massa, ela também cria uma bolha de gás aquecido que se expande em todas as direções. Todavia, no caso dessas estrelas, a expansão ao longo do disco se limita a certa distância da estrela central, preservando assim o disco e o ambiente externo. Na direção perpendicular, o gás aquecido de alta pressão escapa ao longo da direção do campo magnético formando um jato que vai interagir com a nuvem molecular ou o resto do glóbulo que não foi consumido nessa "gestação".

A principal característica da formação dessas estrelas é que elas preservam o disco de gás e poeira do qual se formam os sistemas planetários. É exatamente num sistema planetário como esse que se encontra a única forma de vida ***"inteligente"*** que se conhece.

Uma representação esquemática dos estágios primordiais de evolução dessas estrelas é mostrada na figura 7B.

Os estudos da atividade de formação de estrelas nas nuvens moleculares, realizados na última década, mostram que as estrelas de grande massa nascem apenas em nuvens

moleculares gigantes onde também se formam estrelas de pequena massa. Esse é o caso de nuvens moleculares como Orion e NGC6334. Por outro lado às nuvens moleculares escuras, que tem massas até mil vezes menores que as gigantes, forma apenas estrelas de pequena massa. Esse é o caso, por exemplo, das nuvens conhecidas como Cepheus, Taurus, Musca, Chamaeleon etc.

5.5.3. ROTAÇÃO DAS NUVENS.

As observações dos glóbulos mostram que eles têm rotações muito pequenas ou quase imperceptíveis.
Mesmo sendo pequena, essa rotação pode ter conseqüência muito importante na história evolutiva de um glóbulo. Por menor que seja esse movimento no início do colapso, caso em que a rotação é originária da própria rotação galáctica, ele acaba sendo importante nos estágios finais porque o colapso conserva o momento angular. Isto é, quanto menor for o raio do glóbulo colapsando, mais rápido ele gira.
Se o glóbulo gira mais rápido à medida que o colapso prossegue, o que deveria acontecer com o campo magnético se, de acordo com as discussões anteriores, ele é arrastado pelo gás?

Seria de se esperar que ele também fosse arrastado pelo movimento de rotação. Como conseqüência o campo tenderia a torcer sobre si mesmo. Como o campo se opõe a esse movimento, da mesma forma que ao colapso, a torção resulta na diminuição da velocidade de rotação do gás. Esse efeito é um dos mecanismos capazes de explicar porque a rotação de estrelas recém-formadas não conserva a energia de rotação das nuvens progenitoras. Devido a esse tipo de torção do campo, pode haver uma situação extrema em que o próprio sentido de giro da estrela pode ser invertido.
Na realidade, as observações de algumas estrelas jovens com massa idêntica à do Sol (estrelas T Tauri) mostram movimento de rotação contrário à rotação da sua nuvem progenitora com energia da rotação sempre menor do que a energia de rotação inicial

5.6. BIBLIOGRAFIA

Wynn-Williams, G. "The Fullness of Space". Cambridge University Press, 1992.

Taylor, S.R., "Solar System Evolution. A New Perspective". Cap 2. Cambridge University Press, 1992

Verschuur, G. L. "Interestellar Matters". Spring-Verlag, 1990.

Ronan, C. A. "História Ilustrada da Ciência". Jorge Zahar Editor Vols. I e II. 1991.

Proceedings of the International Conference "Star Formation 1999". Nagoya, Japan.
Obs: Material disponível via Internet.

Física –UFRGS, 1999.

Capítulo 6

A VIDA DAS ESTRELAS

Hugo Vicente Capelato*

* e-mail: hcapelato@gmail.com

ESTRELAS

LISTA DE FIGURAS....................4

6.1. INTRODUÇÃO....................6

6.2. A COR E O BRILHO DAS ESTRELAS....................7

6.2.1. A SEQUÊNCIA PRINCIPAL DE ESTRELAS....................9

6.2.2. ACIMA DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL....................10

6.2.3. ABAIXO DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL....................10

6.2.4. AS ESTRELAS VARIÁVEIS....................11

6.3. O INTERIOR DAS ESTRELAS....................12

6.3.1. AS ESFERAS DE GÁS QUENTE....................12

6.3.2. POR QUE AS TEMPERATURAS SÃO TÃO ALTAS ?....................14

6.3.3. CONVECÇÃO E ONDAS SONORAS NAS ESTRELAS....................15

6.4. A GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NAS ESTRELAS....................18

6.4.1. OS NÚCLEOS ATÔMICOS....................19

6.4.2. FUSÃO OU FISSÃO ?....................21

6.4.3. O EFEITO TÚNEL....................22

6.4.4. INTERAÇÕES FRACAS....................23

6.5. O NASCIMENTO DAS ESTRELAS....................24

6.5.1. As Nuvens Interestelares: berçário das estrelas..24

6.5.2. Por que nascem as estrelas ?...25

6.5.3. A vida das proto-estrelas...26

6.6. Vida e morte das estrelas..27

6.6.1. A estrela esgota o seu reservatório de Hidrogênio.....................................27

6.6.2. A velhice...28

6.6.3. Gigantes vermelhas e Anãs brancas...29

6.6.4. As Supernovas...30

6.6.5. Estrelas de neutrons e buracos negros...33

6.7. bibliografia..34

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 5.1 - O DIAGRAMA H-R, QUE MOSTRA COMO AS ESTRELAS SE DISTRIBUEM CONFORME SUA COR (TEMPERATURA) E BRILHO (LUMINOSIDADE). AS LINHAS TRACEJADAS INDICAM COMO SE POSICIONAM AS ESTRELAS DE MESMO TAMANHO FÍSICO (I. É, MESMO RAIO). AS ESTRELAS "ANÃS" SITUAM-SE NAS REGIÕES INFERIORES DO GRÁFICO E AS "GIGANTES" NAS REGIÕES SUPERIORES. ALGUMAS ESTRELAS CONHECIDAS FORAM DESTACADAS COM SÍMBOLOS INDICANDO O SEU TAMANHO RELATIVO (SEM SEGUIR NENHUMA ESCALA VERDADEIRA)..........8

FIGURA 5.2..........14

FIGURA 5.3 - ESTA FIGURA ILUSTRA COMO OS FÓTONS DE RADIAÇÃO SE DIFUNDEM ATRAVÉS DE UMA ESTRELA COMO O SOL. NO CASO DO SOL, O TEMPO QUE A RADIAÇÃO LEVA PARA SE DIFUNDIR DESDE O CENTRO ATÉ A BASE DA ENVOLTÓRIA CONVECTIVA É DA ORDEM DE 10 MILHÕES DE ANOS. QUER DIZER, SE POR ACASO A PRODUÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NO SOL CESSASSE ABRUPTAMENTE, NÓS SÓ PERCEBERÍAMOS QUE ALGO DE IMPORTANTE ACONTECEU, 10 MILHÕES DE ANOS DEPOIS !..........18

..........18

FIGURA 5.4 - A CURVA DA ENERGIA DE LIGAÇÃO DOS DIFERENTES NÚCLEOS ATÔMICOS. A ENERGIA DE LIGAÇÃO MÁXIMA, POR NÚCLEON, OCORRE PARA NÚCLEOS NA REGIÃO DO NÚCLEO DO FERRO (A = 56)..........20

..........25

FIGURA 5.5 - AS ESTRELAS DAS PLÊIADES NASCERAM APROXIMADAMENTE HÁ 60 MILHÕES DE ANOS ATRÁS E AINDA ESTÃO "VESTIDAS" COM OS RESTOS DE SUA NUVEM-MÃE..........25

FIGURA 5.6 - NEBULOSA PLANETÁRIA. ESTA É A NEBULOSA DA HÉLICE, A MAIS PRÓXIMA DE TODAS AS NEBULOSAS PLANETARIAS (450 ANOS-LUZ). A PEQUENA ESTRELA CENTRAL É O CAROÇO BRILHANTE DA ESTRELA CUJA ENVOLTÓRIA, HOJE, CONSTITUE A NEBULOSA...........30

....30

FIGURA 5.7 - A NEBULOSA DO CARANGUEJO NA CONSTELAÇÃO DO TOURO É UMA DAS FONTES MAIS INTENSAS EM ONDAS DE RADIO E TAMBÉM EM RAIOS-X E ULTRA-VIOLETA. A SUA LUMINOSIDADE TOTAL É 100.000 VEZES MAIOR QUE A LUMINOSIDADE DO SOL. ESTE IMENSA ENERGIA DA NEBULOSA VEM DO PULSAR QUE SE ENCONTRA NO SEU CENTRO. ESTA NEBULOSA É O RESTO DE UMA SUPERNOVA QUE EXPLODIU NO ANO DE 1054DC E QUE FOI REGISTRADA (A OLHO NU E DURANTE O DIA !!!) PELOS CHINESE E TAMBÉM PELOS ÍNDIOS NORTE-AMERICANOS...33

6.1. INTRODUÇÃO

Vamos começar o nosso estudo por uma inspeção mais ou menos superficial na "floresta" de estrelas que vemos nos céus. A primeira coisa que notamos é que elas são fontes de luz muito mais fracas que o Sol. A segunda coisa é que suas cores aparentes são variáveis, desde um branco azulado da maioria, até o um amarelo avermelhado, um pouco mais raro. Há ainda um terceiro aspecto, embora este já não seja muito óbvio a olho nu: é que a maioria das estrelas agrupam-se em pequenas famílias de dois, três ou mais membros. Um bom exemplo disto é a estrela Alfa do Centauro, a estrela mais próxima de nós, que na verdade é um sistema *triplo* de estrelas. Outro é o grupo de 7 estrelas que formam as *Plêiades*, discutido mais adiante[1]. Na verdade quase metade das estrelas fazem parte de sistemas duplos, de apenas dois membros, chamados *estrelas binárias*. A maioria destas estrelas duplas, embora vivam juntas, distam entre si várias *unidades astronômicas* (uma unidade astronômica, UA, é a distâncias da Terra ao Sol; veja o Cap. 1), movendo-se uma em torno da outra com períodos de vários anos. Existem no entanto estrelas binárias cuja separação é muito menor e que se movimentam com períodos de apenas algumas horas! Estas estrelas estão tão próximas uma da outra que são capazes de trocar entre si seu material envoltório. Muitas vezes esta troca ocorre de maneira um pouco violenta, e então podem acontecer explosões locais que expulsam a matéria para longe do sistema. Em outros sistemas binários, onde acontece que uma das componentes seja uma estrela muito compacta e densa, o material da companheira flui mais calmamente, formando um disco luminoso em torno da estrela compacta.

A distância média que separa estrelas vizinhas (ignorando os sistemas binários) é de cerca de 4 anos-luz. Esta distância eqüivale a 253.000 unidades astronômicas ou a 27 milhões de vezes o diâmetro do Sol: o espaço entre as estrelas é imenso, comparado com o tamanho das estrelas, ou mesmo do Sistema Solar.

---

[1] Mas não confunda estes grupos estelares de que falamos aqui, com as constelações tradicionais. Estas, na sua grandíssima maioria, não passam de configurações *aparentes* de estrelas, sem nenhuma relação entre si (veja o Cap. 1).

6.2. A COR E O BRILHO DAS ESTRELAS

Assim como o Sol, as estrelas são bolas de gás muito quente que emitem sua radiação para o espaço. Há duas propriedades das estrelas que são de interesse imediato: a sua cor e o seu brilho. A **cor** de uma estrela é determinada pela *temperatura* em que se encontra a sua superfície[2] , enquanto que o seu **brilho** é determinado pela *quantidade de luz que ela irradia por segundo*, através de toda a sua superfície. Podemos construir um diagrama de cor *versus* brilho das estrelas, como na Figura 5.1, onde cada ponto indica o brilho e a cor de uma determinada estrela. Um diagrama deste tipo é conhecido como diagrama de Hertzprung-Russel (HR).

O Sol tem uma cor intermediária amarelo-claro. A sua temperatura na superfície é de cerca de 5 800 K (graus Kelvin[3]). Uma grande parte das estrelas é parecida com o Sol, com cores e tamanhos comparáveis. Outras estrelas são bem maiores e vermelhas: são as estrelas *gigantes vermelhas*, cuja temperatura na superfície é da ordem de 3 000 K. Há ainda estrelas de cor branca e tamanho muito pequeno, quase tão pequenas quanto a Terra: são as estrelas *anãs brancas*, que tem temperaturas superficiais da ordem de 10000 K.

O brilho[4] de uma estrela é a taxa com que a sua energia luminosa é emitida. O brilho de uma estrela depende somente da sua temperatura superficial e da área total de sua superfície. As estrelas gigantes vermelhas, de temperaturas relativamente baixas, tem uma grande área superficial, por isso são estrelas brilhantes, luminosas. A estrela Betelgeuse, na constelação de Orion, é um bom exemplo de uma estrela gigante vermelha. Já as estrelas anãs brancas tem altas temperaturas superficiais mas, por serem muito pequenas, tem áreas superficiais também muito pequenas e são muito pouco brilhantes: impossível enxergar qualquer uma delas a olho nu! No diagrama H-R da Figura 5.1 nós desenhamos também as linhas tracejadas que indicam os lugares onde

---

[2] **Quanto mais quente for um objeto, mais azul será a radiação por ele emitida**. Esta lei da física foi estabelecida em 1898 por Wilhem Wien. Podemos vê-la em funcionamento, observando a cor da chama de um fogão de cozinha: uma chama bem azulada indica uma chama quente, enquanto que uma chama mais avermelhada indica uma chama mais fria.

[3] Para obter a temperatura em graus Celsius (ºC), subtraia 273 do valor em graus Kelvin. A temperatura da superfície do Sol portanto é 5 527 ºC.

[4] Neste capítulo estaremos sempre falando do brilho *absoluto* da estrela, diferente do seu brilho *aparente* o qual varia conforme a distância em que ela se encontra – veja o Cap. 2 a este respeito.

devem cair as estrelas de mesmo raio[5]: é fácil ver quão correto foi batizar de *Super*-gigante uma estrela como Betelgeuse.

Figura 5.1 - O diagrama H-R, que mostra como as estrelas se distribuem conforme sua cor (temperatura) e brilho (luminosidade). As linhas tracejadas indicam como se posicionam as estrelas de mesmo tamanho físico (i. é, mesmo raio). As estrelas "anãs" situam-se nas regiões inferiores do gráfico e as "gigantes" nas regiões superiores. Algumas estrelas conhecidas foram destacadas com símbolos indicando o seu tamanho relativo (sem seguir nenhuma escala verdadeira).

Muitas vezes nós estamos interessados na quantidade **total** de radiação[6] emitida por segundo pela estrela. Uma parte desta radiação pode nem ser detectável pelos nossos olhos. Neste caso, no lugar de falar de brilho para a radiação total (visível e invisível), falamos da *luminosidade* da estrela. A luminosidade de uma estrela é a potência que ela

---

[5] Medidos com relação ao raio do Sol, simbolizado por $R_\odot$ ($R_\odot$ = 696.000 km)

[6] Radiação eletromagnética ! Recorde das lições do capítulo **2**: a *luz* que vemos é uma forma de radiação *eletromagnética*, assim como o são as ondas de *radio* ou os *raios-X*.

é capaz de gerar no seu interior, em geral através de reações nucleares *de fusão* (ao contrário dos reatores de energia do tipo dos instalados em Angra dos Reis, aonde as reações nucleares são *de fissão* – adiante discutiremos isso). A luminosidade do Sol é $3,8\text{x}10^{26}$ Watts, valor que simbolizamos por $L_\odot$. Para as outras estrelas, preferimos medir suas luminosidades com referência à luminosidade do Sol: a estrela Betelgeuse, por exemplo, tem luminosidade de $10^4 L_\odot$, quer dizer, ela é 10 000 vezes mais luminosa que o Sol. No diagrama H-R da Figura 5.1, o brilho das estrelas está expresso em termos da sua luminosidade, enquanto a cor está em termos da sua temperatura superficial.

6.2.1. A SEQUÊNCIA PRINCIPAL DE ESTRELAS

Quando examinamos como se distribuem os pontos correspondentes às estrelas no diagrama H-R (Figura 5.1), algo notável aparece: os pontos não se distribuem aleatoriamente por todo o diagrama. Ao contrário, eles tendem a se concentrar em algumas regiões definidas. A maioria das estrelas, incluindo o nosso Sol, ficam numa faixa que corre mais ou menos diagonalmente pelo diagrama. Esta faixa é denominada *Sequência Principal,* e as estrelas que aí se localizam são chamadas de *estrelas da Sequência Principal*. Aqui, as estrelas *mais vermelhas* - mais frias superficialmente – são as *menos luminosas,* enquanto que as estrelas mais azuis - mais quentes - são as mais luminosas.

As massas das estrelas pode variar bastante. Na sequência principal, as estrelas que têm maior massa são as mais brilhantes e, portanto, mais azuis e mais quentes superficialmente. Ao contrário, as estrelas de *menor massa* são as *menos brilhantes* e, portanto, *mais vermelhas e mais frias*. As massas das estrelas na sequência principal variam bastante. Uma fração considerável de estrelas tem massas entre 0,1vezes a 10 vezes a massa do Sol[7], mas a maior parte tem massas da ordem de 0,8 $M_\odot$, ou pouco menor: são as anãs-vermelhas, muitas vezes encontradas como companheiras invisíveis de estrelas normais. Mas existem também algumas estrelas cujas massas podem chegar até a 60 $M_\odot$. Essas estrelas são 10 milhões de vezes mais brilhantes que o Sol: se Alfa do Centauro fosse uma delas, brilharia no nosso céu tanto quanto a Lua cheia! As estrelas da sequência principal também nunca são muito grandes: os seus raios variam de 0,001 até 25 vezes o raio do Sol, no caso das estrelas mais brilhantes.

[7] simbolizado por $M_\odot$ - $M_\odot = 2\text{x}10^{33}$ gramas.

Todas as estrelas da sequência principal produzem a energia que irradiam através de reações nucleares muito semelhantes àquelas que ocorrem durante a explosão de uma bomba-H: *convertendo núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio.* Cerca de 80% da massa destas estrelas está na forma de hidrogênio, de modo que fica claro que elas tem combustível para passar muito tempo na sequência principal. As de maior massa, porque são mais brilhantes, devem passar um tempo menor: como sua luminosidade é desproporcionalmente maior, elas devem "queimar" seu hidrogênio mais rapidamente que as estrelas com massa menor.

Quando o "combustível" hidrogênio começa a faltar no centro das estrelas da sequência principal, elas começam a sair da sequência principal. O seu destino então será o de se expandirem e se transformarem em estrelas gigantes vermelhas.

6.2.2. ACIMA DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL

No diagrama H-R, acima da sequência principal, encontramos as *estrelas gigantes vermelhas*. Estas estrelas são esferas distendidas de gás – algumas vezes chegam a ser maiores que a órbita da Terra em torno do Sol - frias e luminosas. Embora a sua temperatura superficial seja baixa, as suas áreas superficiais são tão grandes que fazem com que elas tenham altíssimas luminosidades, de centenas a milhares de vezes superiores à do Sol.

As gigantes vermelhas são estrelas que já esgotaram boa parte de suas reservas de hidrogênio: como, então, podem emitir tanta energia para serem assim luminosas ? Estas estrelas deixaram a sequência principal e agora as *suas regiões centrais estão se contraindo*, na busca de fontes alternativas de energia nuclear. Nesta contração, uma parte da *energia potencial gravitacional* contida na estrela é liberada. É esta energia que provê a sua luminosidade. Mas isto somente por curtos períodos, até que outros "combustíveis" nucleares possam entrar em "ignição". Adiante iremos rever estas questões com maiores detalhes.

6.2.3. ABAIXO DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL

Abaixo da sequência principal encontram-se as estrelas anãs-brancas. Estas estrelas tem aproximadamente o tamanho da Terra, embora sua massa seja da ordem da massa do

Sol. São, portanto, estrelas muito densas. Como elas são pequenas, embora tenham altas temperaturas superficiais, não são muito luminosas.

As anãs-brancas são o último estágio da evolução de muitas estrelas. Nesta fase a sua luminosidade é unicamente devida à energia térmica ou seja, calor, ainda disponível: a estrela se esfria lentamente. Mais de 10% das estrelas na nossa vizinhança são anãs-brancas, mas elas são muito difíceis de serem vistas, dada a sua fraca luminosidade.
Nem todas as estrelas, no entanto, terminam suas carreiras como anãs-brancas. Algumas tornam-se estrelas de neutrons, e outras ainda transformam-se em buracos negros.

6.2.4. AS ESTRELAS VARIÁVEIS

A maioria das estrelas têm brilho praticamente constante no tempo. Ocorrem sempre pequenas variações, erráticas, em geral imperceptíveis a olho nu. Isto sem contar, é claro, com a lenta – lentíssima - variação de brilho devido ao fato que as estrelas evoluem, mudando lentamente de posição no diagrama HR. Mas isto só seria notável em escalas de tempo de 10.000 ou 100.000 anos ! Contudo, em certas fases da vida estelar a evolução pode muito mais rápida e então as variações de brilhos podem vir a ser mesmo espetaculares. Mais adiante voltaremos a isto.

Existe também uma minoria de estrelas cujo brilho varia periodicamente, aumentando e diminuindo em escalas de meses , dias ou mesmo em escala de horas. Estas estrelas são chamadas de *estrelas variáveis*. Na verdade, mais de 25% de todas as estrelas variáveis não tem de fato o seu brilho variável: são na realidade sistemas binários *eclipsantes,* nos quais a aparente variação do brilho se deve ao fato de uma das estrelas componentes eclipsar a outra, ao passar pela sua frente.

As estrelas variáveis “de fato” são estrelas que periodicamente se expandem e se contraem, pulsando tanto em brilho como em tamanho. Por isso são também denominadas *estrelas pulsantes*. Uma importante classe de estrelas pulsantes são as estrelas conhecidas como *cefeidas*. São estrelas que se encontram acima da sequência principal, com brilhos de 100 a 10 000 vezes o do Sol. Têm cores ligeiramente mais avermelhadas que o Sol. Seus períodos de pulsação variam entre 3 a 50 dias, e em cada pulsação seus brilhos podem variar de até 5 vezes em relação ao seu brilho médio. As cefeidas são estrelas de massa maior que o Sol e que já evoluíram além do estágio de

gigantes vermelhas. Elas oscilam porque assim podem liberar mais facilmente a radiação aprisionada no seu interior.

As cefeidas são também importantes porque podem ser usadas como indicadores de distância. Acontece que o período de pulsação de uma cefeida está relacionado com o seu brilho média: quanto maior este, maior será o período. Então, se medirmos o período de uma cefeida, coisa relativamente fácil de fazer, poderemos calcular a sua luminosidade. Comparando esta com o brilho aparente da estrela, podemos calcular a sua distância. É bom lembrar que a medida de distâncias, sobretudo as mais longínquas, é uma das tarefas mais difíceis na astronomia. Por causa disto, uma das missões mais importantes do telescópio espacial Hubble foi medir os períodos de estrelas cefeidas pertencentes às galáxias mais próximas de nós: assim, conseguiu-se medir a distância destas galáxias, coisa impossível até então.

6.3. O INTERIOR DAS ESTRELAS

6.3.1. AS ESFERAS DE GÁS QUENTE

As estrelas são enormes bolas de gás muito quente e de radiação eletromagnética, que irradiam energia no espaço interestelar. Esta energia, que é emitida na superfície da estrela, é produzida no seu interior mais profundo, sendo lentamente difundida por toda a estrela até escapar pela sua superfície. Todos nós sabemos que o calor, isto é, a energia térmica, sempre flui das regiões quentes para as regiões frias. Isto implica que o centro da estrela deve ser muito mais quente que a sua superfície. Na verdade, a temperatura central das estrelas é estupidamente grande. No Sol, por exemplo, a temperatura central deve atingir os 15×10^6 K, quer dizer, algo como 2.500 vezes maior que a sua temperatura na superfície. Na sequência principal, a temperatura central das estrelas varia de maneira aproximadamente proporcional à massa da estrela: uma estrela de $60 M_\odot$ da sequência principal dever ter então uma temperatura central da ordem de $60 \times T_{\text{central do Sol}} = 900 \times 10^6$ K, quase 1 bilhão de graus !!!

As estrelas são bolas de gás quente *auto-gravitantes* : essa palavra significa que a estrela é mantida coesa por causa da ação das forças gravitacionais geradas por ela própria, isto é, por sua própria massa. Imagine um pedacinho da estrela a uma certa

distância do centro da estrela: a força de gravidade produzida pelo resto da massa da estrela *interior* à posição do nosso pedacinho é que produz o seu peso, que o puxa em direção ao centro da estrela. O peso do nosso pedacinho tem que ser contrabalançado por uma outra força, senão ele cairia em direção ao centro e, como ele, o restante da estrela, que assim iria colapsar. Esta força é exercida pela pressão do gás quente que constitui o interior da estrela[8]. Se, numa fantasia, fosse possível "desligar" a pressão do gás no interior do Sol, bastaria 1 hora para ele colapsar e se transformar num buraco negro.

O balanço entre a pressão do gás (na verdade a diferença, ou gradiente, de pressão) e a gravitação é fácil de ser entendido. Considere no interior da estrela uma camada esférica imaginária, feita do gás contido entre as suas duas superfícies, tal como na Figura 5.2. Do lado da superfície interna da camada, a pressão do gás da estrela empurra a camada para fora, enquanto que na superfície externa, o gás da estrela *press*iona a camada para dentro. Como a estrela está em equilíbrio, a camada não se move: será o próprio peso da camada que irá contrabalançar a diferença entre as pressões externa e interna, de modo que:

Diferença de pressões = peso da camada [9]

Esta expressão é conhecida como *equação de equilíbrio hidrostático*. A estrela pode ser imaginada como constituída por um grande número de camadas esféricas concêntricas, de modo que, à medida que vamos prosseguindo em direção ao centro, a pressão do gás *cresce* ao passarmos de uma camada para outra. No centro, a pressão atinge o seu valor máximo. Nas regiões centrais das estrelas a pressão do gás atinge valores fantasticamente grandes: no centro do Sol ela é de 10^{11} atm (100 bilhões de atmosferas), o que equivaleria, na Terra, a uma coluna pesando 100 milhões de toneladas, cuja base fosse uma moedinha de 1 centavo!

[8] Além do gás, o campo de radiação eletromagnética também exerce uma pressão que contribue significativamente para o equilíbrio da estrela.

[9] Mais corretamente esta equação deveria ser escrita assim: $P_{int}*A_{int} - P_{ext}*A_{ext}$ = *peso da camada,* sendo P_{ext} e P_{int} as pressões externa e interna respectiva e A_{ext} e A_{int} as áreas externa e interna, respectivamente, da camada.

FIGURA 5.2

6.3.2. POR QUE AS TEMPERATURAS SÃO TÃO ALTAS ?

A densidade média de massa do Sol é cerca de 1,4 g/cm^3 (gramas por centímetro cúbico), isto é, 1,4 vezes a densidade da água. No entanto, a densidade no centro do Sol é mais de 100 vezes maior, aproximadamente 150 g/cm^3. Não existe nada parecido no mundo das substâncias sólidas ou líquidas: nenhum sólido ou líquido pode existir a estas densidades, suportando as enormes pressões que prevaleceriam. Na verdade, a única forma de matéria possível no Sol (e nas estrelas em geral), é a forma gasosa, a temperaturas extremamente altas.

A pressão de um gás é proporcional ao produto da sua temperatura pela sua densidade. Resulta, então, que para termos altas pressões necessitamos altas temperaturas. Esta é a razão das altas temperaturas no interior das estrelas: a necessidade de grandes pressões que equilibrem a força de gravidade produzida pela enorme quantidade de massa que as estrelas contém.

Um gás a temperaturas de milhões de graus não se parece em nada com aqueles que estamos familiarizados (p. ex., a atmosfera em que vivemos). Os átomos se movem a altíssimas velocidades, centenas de quilômetros por segundo [10] . Quando eles colidem

---

[10]) A velocidade média das partículas de um gás varia aproximadamente com a raiz quadrada da sua temperatura (mais exatamente, com $\sqrt{T/m_p}$, onde m_p é a massa da partícula). Na nossa atmosfera, a temperaturas de 27°C = 300 K, as moléculas de oxigênio tem velocidades médias de aproximadamente 0,5 km/s

uns com os outros – e isto acontece com frequência nestes meios tão densos – a interação é tão violenta que todos os elétrons são arrancados e os átomos tornam-se completamente ionizados. O gás então consiste, de fato, de núcleos atômicos e elétrons movendo-se independentemente. A radiação que é produzida neste gás quente e denso é constituída de raios X intensos, e não daquela radiação luminosa que escapa da superfície relativamente fria da estrela. No entanto, cada fóton de raios X do interior estelar viaja em média somente cerca de 0,0001 cm, antes de ser capturado ou desviado por algum núcleo ou elétron do gás.

Isto explica porque as estrelas, ao contrário dos planetas, são intrinsecamente luminosas. No seu interior elas são extremamente quentes devido às altas pressões necessárias para contrabalançar a gravidade. É a radiação produzida por este gás quente, lentamente escapando em direção à superfície, que é responsável pela luminosidade da estrela. As reações nucleares que ocorrem no seu interior compensam esta perda de energia, de modo que a estrela pode se manter luminosa por grandes períodos de tempo. Assim, em última análise, as estrelas são intrinsecamente luminosas por causa das enormes massas que contém (e não por causa da energia nuclear produzida no seu interior).

6.3.3. CONVECÇÃO E ONDAS SONORAS NAS ESTRELAS

A radiação que é produzida originalmente nas regiões centrais das estrelas está sendo constantemente desviada, ou então absorvida e reemitida, pelas partículas (núcleos + elétrons) do gás[11]. Estes processos dificultam, ou mesmo bloqueiam, o fluxo da radiação em direção à superfície (como na Figura 5.3). Esta resistência ao fluxo da radiação é chamada de *opacidade*. Quando a opacidade é alta, como muitas vezes acontece, o gás bloqueia a radiação e então o transporte de calor das regiões de alta temperatura em direção a superfície tem que ser feito por *convecção*: o gás se põe em movimento formando correntes ascendentes quentes e correntes descendentes frias, carregando para cima a energia térmica do interior. No Sol, as partes mais externas tem opacidade muito alta, o que faz que a radiação proveniente do interior não consiga se difundir através delas. Em consequência as camadas mais externas do Sol, chamadas de *envoltória*, entram num estado de convecção parecido com o de uma chaleira em ebulição. É desta

[11] O gás interior das estrelas é tão quente que seus átomos encontram-se *ionizados*, isto é, os seus elétrons encontram-se separados – livres – dos respectivos núcleos.

forma que a energia, que havia sido transportada pela radiação até a base destas camadas, é finalmente transmitida para a superfície.

As estrelas da sequência principal com massas menores que a massa do Sol possuem envoltórias convectivas profundas. Por outro lado, as estrelas da sequência principal com massas maiores que $2M_\odot$ não tem envoltórias convectivas: a opacidade não é tão grande assim, e a radiação pode se difundir até a superfície da estrela. Estas estrelas contudo possuem "caroços" convectivos, isto é ,uma região em torno do seu centro, onde ocorrem correntes de convecção. Nessas estrelas a energia nuclear é produzida numa região central muito pequena, de modo que o fluxo de energia aí é muito grande e a radiação, sozinha, não consegue dar conta do seu transporte: por isso é que ali se estabelecem movimentos convectivos no gás.

A música das estrelas rivaliza com a das baleias. O seu interior é uma sinfonia de sons, reverberando fragores e trovões e sibilando agudos lamentos. Ninguém disse para a estrela qual o tamanho e forma que deveria ter, qual deveria ser a sua temperatura, quanto deveria brilhar, ou como ela poderia compensar a energia que escapa continuamente da sua superfície. São as ondas acústicas que, percorrendo a estrela em aproximadamente 1 hora, fazem com que as várias partes da estrela se comuniquem umas com as outras, permitindo que ela encontre, a todo momento, o estado de equilíbrio mais apropriado e natural. A estrela se reajusta vibrando em vários modos de baixa frequência. Na outra ponta da escala sonora, umas 60 oitavas acima, o sibilar das partículas de alta velocidade, se encontrando e empurrando umas às outras, produzem ondas que atravessam apenas pequenas distâncias. Não bastasse essa imensa orquestração de sons, a estrela também funciona como um enorme alto-falante. Como a densidade de matéria decresce do centro para fora, as ondas sonoras, à medida que se propagam, aumentam de amplitude e, portanto, de intensidade. Desta forma, chega à superfície da estrela uma torrente de ondas sonoras amplificadas que, passando através dela, acaba se dissipando nas camadas atmosféricas da estrela. No caso do Sol, que tem a sua envoltória convectiva como fonte de ondas sonoras, o contínuo bombeamento de energia através de ondas acústicas ajuda a manter a *coroa* a temperaturas da ordem um milhão de graus Kelvin. A *coroa solar*, normalmente vista durante os eclipses, é a camada mais alta da atmosfera da Sol: ela é tão rarefeita que é incapaz de se livrar de toda a energia que recebe na forma de radiação. Então, sua única saída é expandir-se e

expulsar o excesso de energia. Desta maneira a alta atmosfera do Sol parece com um gigantesco motor a jato: o seu combustível é o gás das camadas inferiores que, aquecido pelas ondas acústicas, é expulso em alta velocidade. Este fluxo de matéria em expansão para fora do Sol é o chamado *vento solar*, capaz de retirar do Sol algo como 100 toneladas de massa por segundo. Este fenômeno não é exclusivo do Sol: outras estrelas também têm seus *ventos estelares*, algumas vezes muito mais intensos que os do Sol – tão mais intensos que podemos dizer que algumas estrelas estão literalmente desaparecendo, evaporando-se em escalas de tempo de não mais que alguns milhões de anos.

Figura 5.3 - Esta figura ilustra como os fótons de radiação se difundem através de uma estrela como o Sol. No caso do Sol, o tempo que a radiação leva para se difundir desde o centro até a base da envoltória convectiva é da ordem de 10 milhões de anos. Quer dizer, se por acaso a produção de energia nuclear no Sol cessasse abruptamente, nós só perceberíamos que algo de importante aconteceu, 10 milhões de anos depois !

6.4. A GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NAS ESTRELAS

As estrelas são imensos reatores atômicos que geram energia nuclear. A luz do Sol que nos alimenta é produzida no interior profundo do Sol. Para entender isto vamos precisar nos deter um pouco e examinar como a energia nuclear é gerada nas estrelas.

6.4.1. OS NÚCLEOS ATÔMICOS

Os átomos se combinam entre si para formar as moléculas. As moléculas se mantêm coesas, graças às *forças elétricas* que resultam dos átomos que as compõem, ao compartilharem ou trocarem os seus elétrons mais externos. Estas forças elétricas moleculares não são muito fortes, quando comparadas com as forças nucleares. Assim, se fizermos um rearranjo dos átomos numa molécula, ou se a quebrarmos, o resultado será uma liberação relativamente pequena de energia *química*. A energia química é a forma de energia mais utilizada pela humanidade, por exemplo queimando petróleo ou carvão.

Todos os átomos têm um pequeno núcleo, que é carregado positivamente, rodeado por uma nuvem comparativamente grande de elétrons. O núcleo propriamente é constituído por partículas conhecidas por *núcleons*, que tanto podem ser prótons, que são carregados positivamente, ou neutrons, que não têm carga elétrica. Estes núcleons são mantidos coesos no núcleo, graças a uma outra força, que só ocorre entre núcleons, denominada força ou *interação forte* que é, comparativamente, muito mais forte do que as forças elétricas. Além disso, quando promovemos um rearranjo ou a quebra de um núcleo, podemos, dependendo do núcleo, ter uma liberação ou uma absorção de energia *nuclear,* que é, em geral, milhões de vezes maior que a energia química ordinária.

Imaginemos que dispomos de um reservatório de núcleons livres – prótons e neutrons - os quais possamos combinar e juntar de diferentes maneiras, de modo a produzir os elementos químicos da tabela periódica [12]. Sempre que um núcleo atômico, qualquer que seja, for construído a partir dos seus núcleons individuais, ocorre uma *liberação* de energia. Isto ocorre porque os núcleons sempre se atraem entre si, através da força forte. A energia que é liberada na formação do núcleo a partir dos seus componentes individuais é chamada de *energia de ligação* do núcleo.

Todas as coisas são coesas por algum tipo de energia de ligação de algum tipo. Por exemplo, uma pedra está presa à Terra através da força de gravidade: a sua energia de ligação (à Terra) é a quantidade de energia que seria liberada se a mesma pedra caísse na Terra, vinda do espaço. Neste caso, a força de atração é a força gravitacional. No caso das moléculas, a força atrativa é a força elétrica. Por outro lado, se quisermos

[12] Aliás, este era o sonho dos alquimistas da Idade Média.

“desmontar” um objeto nos seus componentes individuais, iremos precisar *gastar* energia, numa quantidade exatamente igual à sua energia de ligação.

Será mais conveniente agora pensarmos na *energia de ligação por núcleon*, que é calculada simplesmente dividindo a energia de ligação total do núcleo pelo número de núcleons que ele dispõe. A Figura 5.4 mostra como varia a energia de ligação por núcleon dos elementos químicos, em função do seu *número de massa*, que é igual ao seu número total de núcleons (simbolizado por A). Como se pode ver, ela primeiro aumenta até atingir o valor máximo, quando A = 56, o que corresponde ao núcleo do Ferro, e depois diminui para os núcleos mais pesados, de número de massa maior.

FIGURA 5.4 - A CURVA DA ENERGIA DE LIGAÇÃO DOS DIFERENTES NÚCLEOS ATÔMICOS. A ENERGIA DE LIGAÇÃO MÁXIMA, POR NÚCLEON, OCORRE PARA NÚCLEOS NA REGIÃO DO NÚCLEO DO FERRO (A = 56).

Assim, se dispusermos de 224 núcleons livres, então teremos mais energia liberada construindo 4 núcleons de Ferro do que construindo um único núcleo do elemento químico Rádio, de número de massa A=224.

6.4.2. FUSÃO OU FISSÃO ?

Na verdade, é praticamente impossível dispor de núcleons livres como nas experiências imaginárias que fizemos na seção anterior. Os prótons são fáceis de encontrar, pois eles são os núcleos dos átomos de Hidrogênio, o elemento mais abundante do Universo. Mas os neutrons são muitíssimo raros: quando ficam livres eles *decaem*, isto é, transformam-se em outras partículas, muito rapidamente. Assim, se realmente quisermos brincar de alquimistas precisaremos utilizar os núcleos já existentes e a partir deles construir os outros. Podemos juntá-los, e então teremos um processo de *fusão nuclear*, ou quebrá-los em núcleos menores, no processo de *fissão nuclear*. No entanto, embora o objetivo dos alquimistas fosse a transmutação dos elementos, o objetivo da estrela é obter energia nuclear suficiente para compensar as suas perdas. Isto só pode ser realizado quando o núcleo final tem energia de ligação *maior* que os núcleos iniciais. Olhando para a Figura 5.4, vemos que para aumentar a energia de ligação é necessário sempre caminhar em direção ao pico do Ferro. Assim, se estivermos à esquerda, isto é, se dispusermos unicamente de núcleos de elementos mais leves que o Ferro, obteremos energia pela fusão de núcleos leves em núcleos mais pesados: é assim que as estrelas obtém sua energia nuclear. Por outro lado, se estivermos à direita, teremos energia pela fissão de núcleos pesados em núcleos mais leves: esta é a maneira pela qual a Humanidade obtém energia nos reatores nucleares.

As estrelas da sequência principal obtêm sua energia pela fusão de 4 núcleos de Hidrogênio, isto é, 4 prótons, formando 1 núcleo de Hélio. Todavia, a massa de 1 núcleo de Hélio é cerca de 1% menor que a soma das massas de 4 prótons! Isto acontece porque a energia e a massa são equivalentes, de modo que a energia liberada no processo de fusão eqüivale a uma perda de massa, a qual é igual a uma pequena fração da massa original dos 4 prótons. Na verdade, qualquer forma de energia eqüivale a uma massa: por exemplo, uma chaleira de água quando aquecida até o ponto de ebulição pesa um bilionésimo de grama a mais do que quando a água está fria, porque o calor é uma forma de energia e portanto tem massa[13]. Segundo a famosa fórmula de Einstein, a equivalência da energia com a massa se expressa assim:

$$Energia \ = \ Massa \ x \ c^2$$

[13] Se você decidir fazer esta medida, não esqueça de fechar hermeticamente a sua chaleira: qualquer molécula de vapor d’água que escapar irá falsear o resultado !

onde *c* simboliza a velocidade da luz. Assim, poderíamos, em principio, transformar 1 tonelada de matéria em energia: isto supriria a humanidade de energia por pelo menos 1 ano... O Sol produz energia consumindo sua massa a uma taxa de 4 milhões de toneladas por segundo.

As estrelas da sequência principal produzem sua energia pela queima do Hidrogênio e a sua lenta transmutação em Hélio. A energia é produzida na região central da estrela, onde a temperatura e a densidade são mais altas, e então lentamente é transportada para a sua superfície. Isto no leva à seguinte questão: Por que a energia é liberada tão lentamente ? Por que as estrelas não explodem, liberando instantaneamente uma imensa quantidade de energia nuclear ?

6.4.3. O EFEITO TÚNEL

Há dois fatores que impedem que as reações de fusão dos prótons sejam mais rápidas. Uma delas é a chamada *barreira coulombiana,* que acontece porque os prótons têm carga de mesmo sinal e, portanto, se repelem. A repulsão elétrica age como uma barreira, que é por isso adjetivada como "coulombiana"[14]. Quando dois prótons entram em colisão direta, a distância mínima que atingem antes de se repelirem depende da velocidade que tinham: quanto mais rápidos mais próximo irão estar antes de começarem a se afastar devido à repulsão elétrica. Para atingir a distância mínima necessária para iniciar a reação de fusão, os prótons necessitariam ter velocidades da ordem de 10.000 km/s. No entanto, a velocidade média dos prótons no centro do Sol é de apenas 500km/s e, na verdade, em todo o Sol não devemos encontrar nenhum próton com velocidade tão alta! Como, então, é possível que os lentos prótons solares ultrapassem a barreira coulombiana ? Isto acontece graças a um fenômeno denominado *efeito túnel*, pelo qual existe efetivamente a possibilidade de que um próton atravesse "incólume" uma barreira coulombiana, não importando qual velocidade tenha. A probabilidade que isto ocorra – cujo valor depende da velocidade do próton - pode ser calculada a partir das regras da *Mecânica Quântica*, a única teoria física capaz de descrever corretamente o mundo das partículas atômicas e subatômicas. No centro do Sol, levando em conta que a velocidade média dos prótons é de 500km/s e que existem prótons com velocidades maiores e menores que a média, a probabilidade de penetração

[14] O nome vem da lei de Coulomb, que dá a força de atração ou repulsão que ocorre entre as cargas elétricas.

da barreira coulombiana é de aproximadamente 10^{-9}, quer dizer, uma chance de penetração, por efeito túnel, em 1 trilhão (10^{9}) de colisões diretas entre dois prótons. Considerando que no centro do Sol devem ocorrer aproximadamente 10^{9} colisões diretas por segundo, então vê-se que, em média, a cada segundo 1 próton é capaz de penetrar a barreira coulombiana e encontrar-se face a face com outro próton. Mas isso não é tudo.

6.4.4. INTERAÇÕES FRACAS

Existe um segundo obstáculo para a ocorrência da fusão do Hélio: é o fato de que neutrons livres são raríssimos na natureza. Aonde obtê-los ? Na verdade podemos obtê-los fazendo uso da 4ª força da natureza, a chamada *interação fraca.* Através dela pode-se obter a transmutação de um próton num neutron, o que sempre acontece com a emissão de um *pósitron* (que é um elétron de carga positiva e é a antipartícula do elétron normal, negativo) e de uma outra partícula chamada *neutrino,* que tem massa nula e viaja à velocidade da luz [15] Este processo de transmutação de prótons chama-se *decaimento beta.* O problema é que o decaimento beta é um processo muitíssimo lento. É tão lento que, em média, apenas 1 vez a cada 10 bilhões de anos iremos ver dois prótons se encontrando cara a cara e reagindo violentamente e liberando energia a medida que um deles se transforma num neutron e ambos se transformam num núcleo de *deutério*, o Hidrogênio pesado. Mas, uma vez formado o deutério, todo o resto se passa rapidamente. Logo o deutério se combina com outro próton, formando o núcleo de Hélio-3 (2 prótons e 1 neutron) e liberando ainda mais energia. Os núcleos de Hélio-3 então combinam-se rapidamente entre si para formar um núcleo de Hélio-4, o núcleo dos átomos de Hélio normalmente encontrados.

Esta sucessão de reações, nas quais 4 prótons se combinam para formar um núcleo de Hélio-4, é conhecida como *queima do hidrogênio* ou *ciclo p-p.* e pode ser esquematizada como abaixo:

próton + próton => D + e^{+} + neutrino

H^2 + próton => He^3

He^3 + He^3 => He^4 + próton + próton

[15] Acredita-se que a massa do neutrino seja nula, mas seu valor real ainda não é bem conhecido.

Onde D (ou H^2) representa o núcleo de Deutério; He^3 , o de Hélio-3; He^4, o de Hélio-4 e e^+ , o *pósitron*[16]

6.5. O NASCIMENTO DAS ESTRELAS

6.5.1. AS NUVENS INTERESTELARES: BERÇÁRIO DAS ESTRELAS

A maioria das estrelas da nossa Galáxia foram formadas há muito tempo. Apesar disso muitas estrelas são ainda jovens e novas estrelas também estão se formando, como podemos observar na nebulosa de Orion, por exemplo. As novas estrelas nascem nas grandes nuvens de gás e poeira - nuvens escuras - que se espalham pelo meio interestelar. Estas nuvens são formadas por mais de 80% de Hidrogênio (na forma molecular, H_2), uns 18% de Hélio e umas "pitadinhas" - 1% a 2% - de elementos mais pesados.

Estas nuvens, também chamadas *nuvens moleculares,* são imensas: várias centenas de parsecs, chegando a mil anos-luz. Elas contém grande quantidade de massa, de centenas a milhares de vezes a massa do Sol. Algo como 10% de toda a massa da nossa Galáxia está na forma de nuvens moleculares: uma massa equivalente a 10 bilhões de sóis. Se todas elas fossem convertidas em estrelas, a nossa Galáxia seria provavelmente uma das mais brilhantes (e nós, na Terra, morreríamos torrados com a imensa radiação proveniente das estrelas...

Felizmente, em condições normais, as nuvens moleculares não são muito produtivas. A maioria delas passa milhares de anos sem atividade alguma. Na Galáxia inteira nascem menos de uma dezena de estrelas por ano!

A maioria das estrelas jovens da Galáxia encontram-se próximas de seus locais de nascimento e ainda estão envolvidas pelos restos das nuvens que lhes deram origem. Muitas vezes vemos centenas de jovens estrelas reunidas em aglomerações, chamadas de *associações O,B*[17] . Um exemplo são as Plêiades, mostrada na Figura 5.5 abaixo (As

[16] uma partícula "inimiga" do nosso familiar elétron, o e^- : quando os dois se encontram eles se auto-aniquilam, produzindo radiação eletromagnética - radiação !

[17] As estrelas jovens de massas muito maiores que o Sol são sempre quentes; estão situadas na parte superior do ramo da sequência principal do diagrama HR. Os astrônomos classificam as estrelas mais quentes como *tipo O*, em seguida vem as do *tipo B*. Na sequência de temperaturas temos os tipos *A, F, G, K* e *M*. O Sol, pela sua temperatura, é uma estrela tipo G . Confira isto na figura do diagrama HR apresentada antes.

Plêiades são também conhecidas entre nós como os 7 “estrelos” ou cyiuce, em língua tupi). Em casos como este, fica claro que as estrelas nasceram mais ou menos ao mesmo tempo, de uma mesma nuvem interestelar.

FIGURA 5.5 - AS ESTRELAS DAS PLÊIADES NASCERAM APROXIMADAMENTE HÁ 60 MILHÕES DE ANOS ATRÁS E AINDA ESTÃO “VESTIDAS” COM OS RESTOS DE SUA NUVEM-MÃE.

6.5.2. POR QUE NASCEM AS ESTRELAS ?

As grandes nuvens moleculares geram estrelas no seu interior por causa de um fenômeno conhecido como *instabilidade gravitacional*. Num certo sentido, a instabilidade gravitacional pode ser entendida como o inverso do equilíbrio hidrostático que prevalece nas estrelas. Naquele caso, como vimos, o peso de uma camada é equilibrado pela diferença das pressões nos dois lados da camada. Se, por alguma razão, o peso da camada superar a diferença de pressões, teremos o inicio de um movimento de contração que pode se transformar num colapso, isto é, todas as camadas se precipitam em direção a um centro ao mesmo tempo. Forma-se um coágulo de gás mais denso e quente no interior da nuvem: é a *proto-estrela*. À medida que a contração se desenvolve, a temperatura interna do coágulo aumenta até que, em algum momento, as condições de densidade e temperatura tornam-se favoráveis ao início da fusão do Hélio e a consequente produção de energia nuclear. Assim nascem as estrelas. As grandes nuvens interestelares são muito frias, algo como 10 ºK a 100 ºK , isto é, menos que -200 ºC ! Por outro lado elas são também muito pouco densas: menos que 10^{-22} gramas/cm^3,

correspondente a algumas dezenas de átomos por cm^3. Sendo assim tão pouco densas, elas facilmente encontram o equilíbrio hidrostático, apesar das baixíssimas pressões internas Na verdade, não é raro encontrarmos nuvens moleculares em expansão: quer dizer, suas pressões internas são maiores que as forças de gravitação [18] !

Como podemos ver, a situação das nuvens moleculares não é em nada propícia à geração de estrelas no seu interior. Isto talvez explique a sua baixa produtividade. Como, então, nascem as estrelas ? Ocorre que as nuvens sofrem também a ação de outros fatores, externos e internos a elas, capazes de comprimi-las localmente, aumentando a densidade local e assim provocando instabilidades gravitacionais locais. O principal fator externo são os braços espirais da Galáxia, que é o fator mais importante, pois é ele que dá início ao processo; o principal fator interno são as explosões das estrelas mais jovens e maior massa (estas estrelas em explosão são as chamadas estrelas *Supernovas*), formadas no interior da própria nuvem e que fazem com que o processo de formação estelar se propague por toda a nuvem, como um incêndio numa floresta seca.

6.5.3. A VIDA DAS PROTO-ESTRELAS

Assim, por causa da instabilidade gravitacional induzida por causas externas ou internas, a nuvem entra num processo de coagulação generalizado - é a *fragmentação* da nuvem. Como a nuvem normalmente tem movimentos internos - uma *turbulência* interna- os coágulos, além da contração, apresentam também um movimento de rotação. No início, os coágulos são mais ou menos esféricos. Mas, à medida que se contraem, passam a girar cada vez mais rapidamente e, então, lentamente começam a se achatar, tornando-se oblatos. A região central, que tem que suportar o peso de todo o resto do coágulo, acaba se contraindo mais rapidamente, tornando-se mais densa e quente: é o *caroço* do coágulo.

Nas regiões externas ao caroço, que vão se tornando progressivamente mais achatadas por causa da rotação, o gás mantém-se moderadamente frio. Nesta região parte dos elementos mais pesados que o Hidrogênio e o Hélio começam a se combinar, formando microscópicos grãos de poeira. Estes, à medida que colidem uns com os outros, acabam

[18] Para se ter uma idéia do quão rarefeitas são estas nuvens, a densidade de partículas na atmosfera terrestre, a uma altura de 50km, é algo em torno de 10^{16} átomos por cm^3 , 100 trilhões de vezes superior! Como elas são tão rarefeitas, sua opacidade é praticamente nula (mas, então, por que são escuras ?)

se aglutinando em pequenas pedrinhas de rocha meteorítica e gelo que mais tarde darão origem a meteoróides e planetézimos e, mais adiante, formarão os planetas. Tal deve ter sido o processo de formação do nosso Sistema Solar e assim deve ocorrer na maioria das estrelas.

Enquanto isso, o caroço do nosso coágulo continua seu processo de contração, tornando-se denso e quente e se aproximando do estágio final. É a estrela primitiva, ainda envolta por uma grande quantidade de gás e poeira. Neste momento ela descobre que queimando o Hidrogênio em Hélio terá acesso a um imenso reservatório de energia. A estrela entra então num estado convulsivo, à procura da melhor estrutura interna de equilíbrio capaz de ajustar a sua taxa de produção de energia à energia que expulsa pela sua superfície na forma de radiação: ela torna-se uma estrela variável irregular do *tipo T-Tauri* [19]. Neste estado convulsivo, com profundas zonas de convecção desde a superfície, a estrela primitiva passa a produzir um intenso vento estelar que, ao final, acaba por varrer de volta para o meio interestelar todo o material que a envolvia (e possivelmente boa parte da atmosfera dos planetas mais próximos dela...).

Quando, finalmente, encontra a sua melhor estrutura interna a estrela entra num estado quiescente de queima do Hidrogênio em Hélio, o qual pode durar bilhões de anos: agora ela é uma estrela da sequência principal.

6.6. VIDA E MORTE DAS ESTRELAS

6.6.1. A ESTRELA ESGOTA O SEU RESERVATÓRIO DE HIDROGÊNIO

O que irá acontecer com uma estrela da sequência principal após esgotarem todo o seu Hidrogênio central, dependerá da massa que ela que ela tiver. De maneira geral, as estrelas evoluem tanto mais rapidamente quanto maior for a sua massa. As estrelas de massa menor que o Sol, levam muito tempo para fazer isto, mais do que os 10 bilhões de anos, que é a idade da Galáxia. Sobre estas estrelas, só podemos tentar predizer o seu futuro, já que todas elas, mesmo as que nasceram nos primórdios da vida da Galáxia,

[19] A estrela T Tauri, da constelação do Touro, é uma estrela de variabilidade irregular que está envolta numa densa nuvem de gás e poeira. Acredita-se que seja uma estrela jovem, que está ingressando da sequência principal. Estrelas em estágio semelhantes são, por extensão, nomeadas como sendo *do tipo* T-Tauri

ainda se mantém na sequência principal. As estrelas de massa maior que o Sol, no entanto, evoluem mais rapidamente.

Depois que a estrela consome todo o seu suprimento de Hidrogênio central, ela deixa a sequência principal e começa a se mover, no diagrama HR, em direção à região das estrelas *gigantes vermelhas*. A região central agora é constituída quase que inteiramente de Hélio e não produz mais energia alguma. No entanto a estrela continua irradiando energia pela sua superfície. A maior parte desta energia está acumulada na região central, o *caroço* da estrela. Ele perde energia, esfria-se e começa a se contrair, aumentando a sua temperatura e densidade e liberando energia gravitacional[20], parte da qual irá se converter em calor no resto da estrela. Duas coisas então vão acontecer.

Primeiro, o Hidrogênio que está logo acima do caroço central de Hélio vai começar a queimar. Forma-se uma camada de queima de Hidrogênio e esta queima irá progressivamente aumentar o tamanho e a massa do caroço de Hélio. Segundo, a outra parte da energia gravitacional liberada, além da energia nuclear produzida na camada de queima do Hidrogênio, irá aquecer as partes externas da estrela - a sua *envoltória* - a qual começará a se expandir. A estrela aumenta o seu brilho e se torna, de fato, uma gigante vermelha.

6.6.2. A VELHICE

A partir do momento que a estrela deixa a sequência principal, é sinal que ela está entrando na sua “3ª idade” . Ela tem, comparativamente, pouco tempo de vida. Ela percebe, tardiamente, que a vida na sequência principal era por demais calma e sedentária e decide que terá, ao menos, um final glorioso . Infelizmente, não lhe resta muito combustível nuclear. Agora tudo que pode fazer é tentar queimar o Hélio que ainda lhe sobrou, e proceder a fusão paulatina de todos os elementos, passo a passo, até o Níquel e o Ferro. A cada passo, maiores densidades e temperaturas centrais são requeridas e o restante do combustível nuclear é queimado de forma cada vez mais rápida.

---

[20] Como liberar energia gravitacional ? Um experimento simples: amarre uma corda num peso e deixe-o pendurado entre os dedos da sua mão. Agora afrouxe as mãos, deixando o peso cair de forma que a corda deslize entre os seus dedos. Eles vão esquentar: este calor produzido é resultado da conversão da energia gravitacional liberada ao cair o peso (cuidado para não se queimar !!!).

6.6.3. GIGANTES VERMELHAS E ANÃS BRANCAS

Vamos começar considerando as estrelas de massa menor que 2 massas solares. Elas terminam sua vida como anãs brancas. Durante sua fase gigante vermelha, estas estrelas continuam a contrair o seu caroço central até que a sua temperatura e densidade sejam suficientemente altas para iniciar a queima do Hélio em Carbono. Enquanto isto não acontece, a gigante vermelha continua a aumentar o seu brilho. No diagrama HR ela segue uma trajetória praticamente vertical. A ignição do Hélio ocorre quando a temperatura central chega aos 100 milhões de graus (10^8 ºK). Ela acontece de repente: é o chamado *flash do Hélio*. O caroço central se expande subitamente e a luminosidade da estrela diminui até se estabilizar várias ordem de grandeza abaixo, enquanto o Hélio passa a ser queimado de maneira quiescente.

Nesta fase, ou mesmo antes do flash do Hélio, as estrelas produzem ventos intensos e perdem boa parte de suas envoltórias, deixando expostos seus caroços brilhantes. Quando o Hélio central é esgotado acaba a produção de energia nuclear e o caroço se contrai até se tornar uma anã branca. Neste ponto a estrela é constituída por uma envoltória de material ejetado, chamada *nebulosa planetária* e, mais ou menos no centro da nebulosa, uma estrela anã branca, de tamanho comparável ao da Terra, esfriando lentamente (cf. Figura 5.6).

Figura 5.6 - Nebulosa Planetária. Esta é a nebulosa da hélice, a mais próxima de todas as nebulosas planetarias (450 anos-luz). A pequena estrela central é o caroço brilhante da estrela cuja envoltória, hoje, constitue a nebulosa.

Dentro de uns 5 bilhões de anos, o nosso Sol também irá se tornar uma anã branca. Apenas uma luz pálida irá brilhar no nosso gelado planeta, por vários bilhões de anos.

6.6.4. AS SUPERNOVAS

Vamos, agora, considerar o caso das estrelas de maiores massas, situadas na parte superior da sequência principal. Elas rapidamente liquidam com o seu reservatório central de Hidrogênio e deixam a sequência principal em poucas dezenas de milhões de anos. Então, elas se tornam gigantes vermelhas monstruosamente grandes (chamadas de *Super-Gigantes* vermelhas), com o caroço de Hélio rodeado por uma camada onde queima o Hidrogênio. À medida que o caroço se contrai, o Hélio começa a queimar, transformando-se em Carbono e Oxigênio. Logo a estrela passa a ter um caroço inerte de Carbono e Oxigênio, rodeado por uma camada de queima de Hélio, que por sua vez é rodeada por uma camada de queima de Hidrogênio. Passando o estágio de gigante vermelha, a estrela torna-se ainda mais luminosa, sofrendo agora de episódios de pulsação e de ejeção de gás a altas velocidades. Neste estágio, estas estrelas são por vezes denominadas *estrelas Wolf-Rayet*.

O caroço inerte de Carbono e Oxigênio passa então a se contrair na busca de novas fontes de energia nuclear. Quando a temperatura central atinge a casa dos 3 bilhões de graus e a densidade se aproxima dos milhões de gramas/cm^3, o Carbono e o Oxigênio passam a queimar progressivamente em Neônio, Magnésio, Silício, Fósforo, Enxofre, e assim por diante, até o Níquel e o Ferro. No entanto, a energia nuclear liberada por esta multitude de reações é comparativamente pequena e é logo irradiada pela superfície da estrela.

Durante este estágio da estrela ocorrem outras perdas de energia, além daquela na forma de radiação eletromagnética. Hordas de neutrinos, produzidos nas próprias reações nucleares, e também pelo gás que se encontra a altíssimas temperaturas, propagam-se pela estrela livremente, sem nenhuma interação com a matéria. A luminosidade em neutrinos produzidos no interior do caroço aumenta tanto que chega a exceder a luminosidade da estrela na forma de radiação. Chegado este ponto, a única reserva de energia que sobra para a estrela é sua energia gravitacional. Para compensar as perdas cada vez maiores de energia, o caroço tem que contrair cada vez mais rápido. A densidade e temperaturas centrais vão aos píncaros e aí acontece o pior: o caroço começa a perder mais energia porque passa a produzir os elementos mais pesados que o Ferro (reveja a Figura 5.4 para entender porque).

A estrela está, agora, a uns poucos segundos de sua morte. As densidades são tão altas que os neutrinos já não conseguem escapar facilmente. Eles transportam energia do caroço para a envoltória que se aquece cada vez mais, até ao ponto em que reações nucleares começam a ocorrer no próprio manto estelar. O caroço em contração livre colapsa inteiramente, provocando a fissão de todos os elementos pesados, que se desintegram de volta em núcleos de Hélio. O vento de neutrinos se intensifica e se torna uma onda de choque que varre o manto estelar, explodindo no espaço. Nos últimos momentos do caroço em implosão, os próprios núcleos de Hélio são desintegrados em prótons e neutrons: agora, toda a energia que a estrela irradiou durante os bilhões de anos que esteve na sequência principal deve ser imediatamente devolvida. O caroço encontra esta energia através de um colapso ainda mais catastrófico. Os elétrons são espremidos contra os prótons e, juntos, transmutam-se em neutrons[21]. O caroço colapsado, desvestido do seu manto explodido, emerge agora como uma *estrela de neutrons* girando rapidamente. Esta explosão titânica, causada pela energia liberada na

[21] Esta reação é chamada *decaimento beta-inverso*, porque é o inverso do decaimento beta discutido anteriormente

implosão do caroço e pela explosão do manto, resulta numa *Supernova*: por um curto período de tempo ela torna-se tão brilhante quanto todas as estrelas da Galáxia brilhando juntas. Se uma Supernova ocorresse a uma distância equivalente a Alfa Centauro, ela brilharia nos céus da Terra tanto quanto o Sol.

Figura 5.7 - A Nebulosa do Caranguejo na constelação do Touro é uma das fontes mais intensas em ondas de radio e também em raios-X e Ultra-violeta. A sua luminosidade total é 100.000 vezes maior que a luminosidade do sol. Este imensa energia da nebulosa vem do pulsar que se encontra no seu centro. Esta nebulosa é o resto de uma supernova que explodiu no ano de 1054dc e que foi registrada (a olho nu e durante o dia !!!) pelos chinese e também pelos índios norte-americanos.

6.6.5. ESTRELAS DE NEUTRONS E BURACOS NEGROS

Uma estrela de neutrons tem um raio pouco maior que 10km e densidade perto dos 1000 trilhões de gramas/cm^3. Uma gotinha de matéria neutrônica pesaria na Terra milhões de toneladas. Uma estrela de neutrons possui campos magnéticos de 10^{12} gauss - um trilhão de vezes mais intenso que o campo magnético da Terra - e começa sua vida girando rapidamente, a centenas de voltas por segundo. Ela é um *pulsar*.
Das cinzas da estrela morta uma nova estrela nasce, uma estrela que envia através do espaço uma mensagem pulsada que chega aos confins da Galáxia. Por milhões de anos, pulsando cada vez mais lentamente, o pulsar irradia a sua energia rotacional.

As estrelas de neutrons nunca têm massas maiores que 3 massas solares. Isto acontece porque a matéria neutrônica não é capaz de suportar forças gravitacionais produzidas por massas maiores que este valor. Por isso a implosão dos caroços centrais das estrelas

de grande massa nem sempre resultam em estrelas de neutrons. Se sua massa for maior que este valor crítico, a implosão continua até produzir um *buraco negro*. Não iremos discutir estes objetos tão intrigantes, apenas comentar que eles possuem campos gravitacionais extremamente intensos. O espaço-tempo no seu entorno é completamente encurvado e, embora a matéria possa ser atraída por ele, dele nunca poderá escapar.

6.7. BIBLIOGRAFIA

Harrison, E.R. **Cosmology - The Science of the Universe**, Cambridge, 1981, (com o meus agradecimentos: este texto inspirou boa parte destas notas).

Hartmann, W.K. **Astronomy: The Cosmic Journey**, Wadsworth Pubblishing, 1989.

Maciel, W. J. (editor) **Astronomia e Astrofísica** (texto de curso de extensão universitária do Depto. de Astronomia do Inst. Astronômico e Geofísico - USP), 1991.

Capítulo 7

ESTÁGIOS FINAIS DE ESTRELAS

Flavio D'Amico*

* e-mail: flavio.damico@inpe.br

ESTÁGIOS FINAIS DE ESTRELAS

7.1 INTRODUÇÃO 3

7.2 OBJETOS COMPACTOS..3

7.3 MATÉRIA EXTREMAMENTE DENSA 4

7.4 ANÃS BRANCAS...8

7.4.1 Variáveis Cataclísmicas...9

7.5 ESTRELAS DE NÊUTRONS 11

7.5.1 Pulsares..12

7.5.2 Binárias de raios-X..14

7.6 BURACOS NEGROS..17

7.6.1 Histórico 18

7.6.2 Detalhes Observacionais...19

7.7 CONCLUSÕES..19

7.8 BIBLIOGRAFIA 21

7.1. INTRODUÇÃO

Eu tenho que começar o meu Capítulo agradecendo ao Hugo, autor do Capítulo sobre estrelas. Nele, o Hugo deixou a dica de como me dirigir à vocês para apresentar os objetos compactos: objetos de 3ª idade!!! Deve ser a minha pouca experiência (comparada com a do Hugo) que não me permitiu pensar em um nome tão sugestivo.

Minha tarefa aqui é a de apresentar para vocês esses objetos que são frutos da evolução estelar. Esses objetos estelares de 3ª idade são os seguintes: anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros. No Capítulo sobre estrelas o Hugo já mencionou, inclusive, como estas 3 classes de estrelas se formam.

Eu creio que uma abordagem mais apropriada para os nossos objetivos aqui é a *observacional.* Portanto, ao invés de me preocupar com aspectos teóricos mais pormenorizados sobre esses objetos, eu vou procurar enfatizar o conhecimento que nós Astrofísicos adquirimos desses objetos a partir da o*bservação* dos mesmos. Mas é claro que uma introdução um pouco mais formal se faz necessária.

7.2. OBJETOS COMPACTOS

As estrelas de 3ª idade são conhecidas pelo nome de *objetos compactos*. Uma anã branca, por exemplo, tem o seu raio da ordem do raio da Terra, mas uma massa de ~ 1,4 $M_\odot$. Ou seja: uma anã branca típica é um objeto estelar com uma massa cerca de 40% maior do que a massa solar *compactada* em um volume 1 milhão de vezes menor do que o Sol!! Como isso é possível?? Pense, agora, em uma estrela de nêutrons, que tem uma massa (típica) da ordem de 1,4 $M_\odot$ e um raio de apenas 15 km!! Como é possível que um objeto estelar assim exista?? Anãs brancas e estrelas de nêutrons, assim, caracterizam-se por ter uma densidade média elevada e são chamados de *objetos compactos,* assim como os buracos negros.

Exercício 1 - Qual a densidade média de uma anã branca?

(estejam prevenidos que astrofísicos gostam de trabalhar usando unidades no sistema cgs!)

$$\rho = M/V = 1{,}4 \text{ x } 2 \text{ x } 10^{33}/(10^{9})^{3} \sim 3 \text{ x } 10^{6} \text{ g cm}^{-3}$$

Exercício 2 - Qual a densidade média de uma estrela de nêutrons?

$$\rho = M/V = 1{,}4 \text{ x } 2 \text{ x } 10^{33}/(15 \text{ x } 10^{5})^{3} \sim 10^{15} \text{ g cm}^{-3.}$$

Compare as densidades calculadas acima com a densidade da água, por exemplo.

Exercício 3 - Suponha que você retire, da superfície de uma anã branca, uma colherzinha com 1 cm^3 de matéria. Qual a massa que você acabou de retirar?

Já que sabemos a densidade média, fica fácil:

$$M = \rho V \sim 10^{7} . 1 \sim 10^{7} \text{ g} \sim 10 \text{ toneladas!}$$

Vamos passar essa resposta para algo mais mensurável: um elefante africano adulto pesa cerca de 6 toneladas. Assim essa colherzinha de material pesa tanto quanto 1,7 elefantes!!

Exercício 4 - Qual o valor da aceleração da gravidade *g* em uma estrela de nêutrons?

Vejamos (dessa vez eu vou usar o SI para as unidades):

$$g = G . M / R^{2} = 6{,}7 \text{ x } 10^{-11} \text{ x } 1{,}4 \text{ x } 2{,}0 \text{ x } 10^{30} / (15 \text{ x } 10^{3})^{2} \sim 10^{12} \text{ m s}^{-2}$$

7.3. MATÉRIA EXTREMAMENTE DENSA

Vamos recordar, em três ou quatro frases, o que o Hugo nos mostrou sobre as estrelas, apontando para o que me interessa em descrever aqui. As estrelas queimam combustível nuclear, principalmente em sua região central, para gerar uma pressão de radiação (de dentro para fora) de maneira a contrabalançar o colapso gravitacional (de fora para dentro). Na maior parte de suas vidas as estrelas transformam Hidrogênio em Hélio. Quando esta fase acaba, as estrelas usam o "combustível" resultante para um novo ciclo que forneça a tão necessária pressão de radiação, que evita a morte da estrela (vou falar mais adiante sobre o termo "morte" que eu acabei de usar). Assim no novo ciclo (como o Hugo nos mostrou) a estrela transforma Hélio em Carbono. E assim sucessivamente: Carbono em Oxigênio, Oxigênio em Silício, etc.. Enquanto a queima de Hidrogênio e Hélio sustenta a estrela por grande parte de sua vida (como o Hugo nos mostrou), as queimas sucessivas são "rápidas": a queima de Carbono na região central demora alguns mil anos; a queima de Oxigênio demora apenas **1 ano**; a queima de Silício **apenas uma semana**!

Para que a estrela comece a queimar Hélio, a temperatura interna tem que aumentar: momentaneamente a pressão gravitacional vence a batalha, a estrela diminui de tamanho e a temperatura interna aumenta iniciando a queima de Hélio. Identicamente em relação aos outros ciclos: sempre a gravidade vence a batalha para aumentar a temperatura interna para que um novo ciclo de queima comece.

De acordo com o que eu descrevi acima surge, pelo menos, uma questão imediata: e se o aumento de temperatura não for suficiente para iniciar a queima do combustível armazenado? Se isso acontecer, como vimos, a estrela não é capaz de gerar pressão de radiação para conter o colapso gravitacional. Se ela não encontrar um outro mecanismo capaz de conter o colapso, a estrela morrerá. O termo "morte", que eu já usei duas vezes, é errôneo. Por isso eu agradeci ao Hugo no começo por me emprestar a frase "estrelas de 3ª idade". Nós veremos mais adiante que estes objetos compactos (estas nossas estrelas de 3ª idade) ainda produzem energia. Há, ainda, um detalhe muito importante (que o Hugo já chamou atenção): a fusão só é um processo exoenergético até núcleos mais leves do que o do Ferro. Ou seja, se o núcleo estelar for formado

exclusivamente por Ferro, não é mais possível para a estrela ganhar energia a partir da fusão nuclear.

Corrigindo, então, a minha afirmação acima: as estrelas que não atingem o limiar de temperatura necessário para iniciar um novo ciclo de queima nuclear poderão colapsar se não acharem um outro mecanismo físico que forneça uma pressão qualquer capaz de suportar o colapso gravitacional.

Exatamente neste ponto entra o assunto desta seção: a matéria extremante densa. A distância entre os elétrons e o núcleo de um átomo é muito grande. Uma boa imagem (para aqueles que conhecem) é o estádio do Maracanã na Cidade Maravilhosa: se, no Maracanã o núcleo do átomo estiver na marca do meio do campo, as órbitas do elétron estarão nas arquibancadas. Para aqueles que não conhecem o Maracanã, eu preciso ser mais específico: os diâmetros dos átomos, incluindo os o*rbitais eletrônicos*, estão compreendidos entre 1 e 5 Å (1 Å equivale a 10^{-10} m) enquanto que o diâmetro dos núcleos dos átomos é da ordem de 10^{-4} Å. Em outras palavras, um átomo como um todo é, grosso modo, linearmente cerca de 10000 vezes maior do que um núcleo atômico. Fica claro que existe um grande vazio entre as órbitas eletrônicas e o núcleo. E se esse espaço vazio fosse diminuído, obrigando tanto os elétrons a se aproximarem mais uns dos outros como também os átomos? Bem, não é difícil aceitar que a densidade média da matéria aumentaria, como é o caso dos objetos compactos.

Pois é exatamente isso que acontece em uma anã branca. O colapso gravitacional é freado graças a pressão fornecida pelos elétrons. Como as distâncias médias entre os elétrons diminuem muito e como estes se repelem mutuamente, os elétrons adquirem velocidades altíssimas (relativísticas) gerando uma *pressão de degenerescência*: os elétrons são ditos *degenerados*. É esta pressão de degenerescência que dá origem (que sustenta contra o colapso gravitacional) a uma anã branca.

Percebam que, quase de maneira intuitiva (usando, também conhecimentos rudimentares de mecânica quântica), nós chegamos à conclusão de que uma classe de objeto astrofísico "sustentado" pela pressão de degenerescência deve existir. A observação das anãs brancas, assim, é um dos trunfos da teoria de evolução estelar, um dos pilares da astrofísica.

E o que acontece quando a pressão aumenta mais ainda? O que acontece com a estrutura nuclear? É neste momento que eu aproveito para chamar a atenção de vocês de uma coisa que se chama i*nterdisciplinaridade*. Nós sabemos, da física de partículas, alguns fatos interessantes.

Sabemos que quando a densidade aumenta muito, os núcleos desaparecem, ou seja: a energia de ligação dos núcleos diminui com o aumento da densidade. Assim, sob circunstâncias extremas de densidade, temos que prótons (p), nêutrons (n) e elétrons (e^-) estão livres. Sabe-se também que, com o aumento da densidade, há um aumento significativo na seção de choque da reação

$$p + e^- \rightarrow n + \nu$$

(ν é um neutrino). Ou seja, a reação acima é eficientíssima em um regime de altas densidades. Ou seja, quando a densidade é muito grande, nós temos um verdadeiro *mar de nêutrons*.

Estes são os argumentos teóricos que nos permitem imaginar a existência de *estrelas de nêutrons*. Neste tipo de objeto o colapso gravitacional é inibido devido à *pressão de degenerescência dos nêutrons*, de maneira semelhante ao caso das anãs brancas. Esse mar de nêutrons forma, basicamente, uma estrutura cristalina extremamente eficiente tanto para conter o colapso gravitacional quanto equipartir eficientemente a energia para toda a estrela, por exemplo, tornando a temperatura uniforme em toda a estrela rapidamente.

Algum leitor (ou leitora!) mais aguçado (a) e atento (a) já deve estar fazendo o raciocínio descrito a seguir. Em alguns casos, a pressão de degenerescência dos elétrons é capaz de conter o colapso gravitacional. Em outros casos, a pressão de degenerescência dos nêutrons é capaz de fazê-lo. E quando nem esta nem aquela forem suficientes para conter o colapso?

Neste caso, obviamente, o colapso gravitacional continua, indefinidamente. Nós temos a formação de um *buraco negro*, um objeto celeste no qual a densidade é infinita, uma das criaturas mais maravilhosas, sem dúvida, do zoológico cósmico.

Embora, obviamente, o processo de formação de anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros seja entendido hoje em dia com um detalhamento bem maior do que o

simples descrito acima, espero ter conseguido passar, quase intuitivamente, como se formam esses objetos. Vou desprezar aqui uma descrição mais rigorosa de quais estrelas transformar-se-ão, no final de suas vidas, em anãs brancas, ou estrelas de nêutrons ou buracos negros. De maneira geral, seguindo as últimas informações disponíveis na literatura, levando-se em consideração vários mecanismos complexos de perda de massa, pode-se dizer que estrelas acima de 8 $M_{\odot}$ terminarão suas vidas como estrelas de nêutrons **ou** buracos negros, enquanto que estrelas com massa inferior a 5 $M_{\odot}$ terminarão suas vidas como anãs brancas (Glendenning 2000).

7.4. ANÃS BRANCAS

Nós já vimos alguns detalhes de como as anãs brancas se formam, tanto aqui como no capítulo do Hugo. Eu só quero acrescentar mais alguns detalhes históricos ao que já foi discutido.

Desde 1915 a massa da estrela companheira de Sirius, Sirius B, já era conhecida como sendo da ordem de 0,75 — 0,95 $M_\odot$ (esta é, aliás, a anã branca mais bem estudada até hoje). Ficava claro que, com uma massa dessa ordem e com um raio da ordem de 10^9 cm, esta estrela não podia mais iniciar um novo ciclo de queima nuclear e que seu destino seria irradiar energia lentamente, esfriando sua temperatura (ver o capítulo do Hugo).

Em 1914 Walter Sydney Adams (nascido na Síria, mas radicado nos EUA, 1876-1956: Adams1915) mediu o desvio gravitacional (veja o capítulo do Francisco Jablonski) de várias linhas de Sirius B e pode determinar seu raio. Como a massa da estrela já era conhecida, ficou claro a existência de estrelas com densidades da ordem de 10^6 g cm^{-3}. Era, então, necessário explicar-se como uma estrela com uma densidade tão alta como essa podia existir. A reposta veio em 1926, quando Sir Ralph Fowler (inglês, 1899-1944: Fowler 1926), usando a recém proposta estatísitica de Fermi-Dirac, mostrou que a pressão de degenerescência dos elétrons poderia conter o colapso gravitacional nas anãs branca.

Um outro feito, este fantástico e histórico para a Astrofísica, aconteceu em 1930, quando Subrahmanyan Chandrassekhar (indiano, 1910-1995: Chandrasekhar 1931), usando agora já a teoria especial da relatividade, mostrou que uma anã branca tem uma máxima massa possível. Esta massa é da ordem de 1,4 $M_\odot$. Em homenagem ao seu descobridor, este limite máximo de massa em uma anã branca é conhecido como *Massa de Chandrassekhar*. Também neste trabalho, Chandrassekhar apontou as anãs brancas como o estágio final de evolução de estrelas de pequena massa.

Vale a pena transcrever aqui as palavras de Chandrasekhar, que foi laureado com o prêmio Nobel de Física em 1983 (a tradução é minha, a partir do texto em inglês de Shapiro e Teukolsky de 1983): "A história de vida de uma estrela de pequena massa

precisa ser essencialmente diferente da de uma estrela de grande massa. Para uma estrela de pequena massa o estágio de anã branca é um passo natural antes do caminho até a completa extinção. Uma estrela de grande massa não pode passar pelo estágio de anã branca, o que nos deixa margem para especularmos sobre outras possibilidades de evolução".

7.4.1. Variáveis Cataclísmicas

Seguindo a minha idéia de ressaltar os aspectos observacionais dos objetos compactos, descrevo rapidamente as variáveis cataclísmicas.

Quando presentes em sistemas binários, algumas anãs brancas podem receber matéria de uma estrela companheira. Esta estrela companheira, geralmente, é uma estrela da seqüência principal. Estes sistemas binários, com a presença de uma anã branca, são chamados de variáveis cataclísmicas (veja Figura 1). Estes sistemas são de **extrema** importância para a astrofísica, e uma descrição pormenorizada deles está totalmente fora do objetivo deste capítulo. No entanto, eu quero ressaltar a importância desses objetos por uma razão específica. Estes objetos são ótimos para que se estudem os chamados discos de acréscimo, ou, em um neologismo corriqueiramente usado, **discos de acresção**. Discos de acresção estão presentes em vários outros objetos astrofísicos e são as variáveis cataclísmicas que nos permitem saber e estudar a física desses discos detalhadamente. Não fosse a existência das variáveis cataclísmicas, provavelmente nós não poderíamos saber tantos detalhes sobre os discos.

Dependendo da intensidade do campo magnético da anã branca, as variáveis cataclísmicas são classificadas em várias classes, cada uma delas importante para se estudar o aspecto dos discos e também da transferência de matéria em sistemas binários.

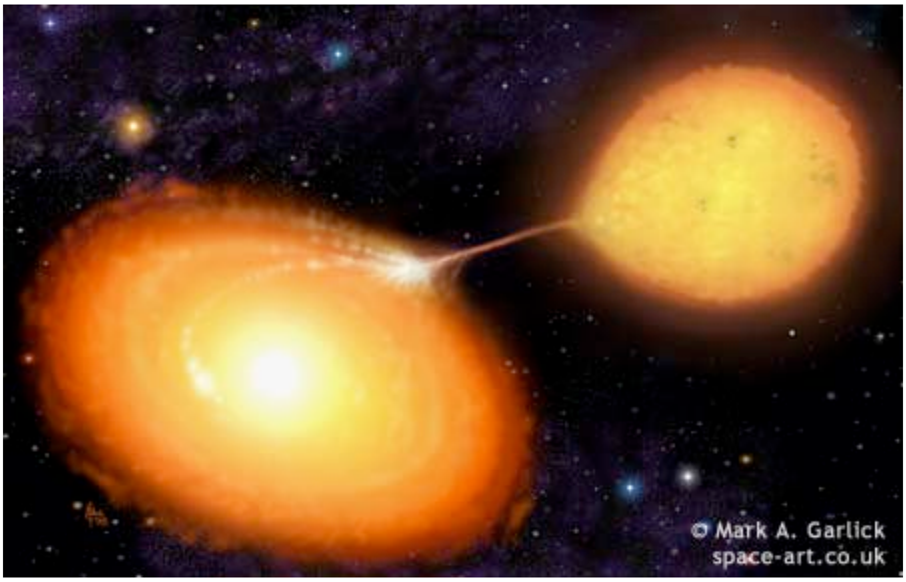

FIGURA 1 - UMA REPRESENTAÇÃO ARTÍSTICA DE UMA VARIÁVEL CATACLÍSMICA. (**Reprodução usada com a permissão do autor)**

7.5. ESTRELAS DE NÊUTRONS

De todos os objetos compactos, as estrelas de nêutrons são a minha classe favorita por razões óbvias: grande parte do meu trabalho atualmente é dedicado a estudar sistemas binários contendo estrelas de nêutrons. Provavelmente, então a minha descrição aqui será mais rica do que no caso das anãs brancas, o que me obriga a pedir desculpas por este tratamento diferenciado.

A ideia de que estrelas de nêutrons existiam é relativamente antiga. Em um artigo em 1934, Walter Baade (nascido na Alemanha, mas radicado nos EUA, 1893-1960) e Fritz Zwicky (nascido na Suíça e também radicado nos EUA, 1898-1974) propuseram a existência das estrelas de nêutrons (Baade e Zwicky, 1934), objetos de maior densidade do que as anãs brancas. Neste artigo os autores também, podem dizer: *profetizaram* (já que nenhuma evidência existia na época) que estrelas de nêutrons nascem em explosões de supernovas (veja o capítulo do Hugo sobre estrelas). Em 1939 Robert Oppenheimer (americano, 1904-1967) e George Michael Volkoff (russo, 1914-2000) publicaram um artigo com os primeiros cálculos estruturais sobre uma estrela de neutrons (Oppenheimer e Volkoff, 1934). Outros trabalhos seguiram-se sobre o tema, mas as estrelas de nêutrons foram “deixadas de lado” pelo simples fato de que , com a

tecnologia disponível na época, elas não podiam ser observadas. Na década de 60, entretanto, duas descobertas fantásticas reavivaram o interesse em estudá-las: a descoberta da primeira fonte não solar de raios-X, Scorpius X-1 (ou Sco X-1) pelo italiano (laureado com o prêmio nobel de física de 2002) Riccardo Giacconi (nascido em 1931: Giacconi et al. 1962) e a, não-menos fascinante, descoberta do primeiro pulsar rádio por, na época uma jovem doutoranda, Jocelyn Bell (inglesa, nascida em 1943: Hewish et al. 1968). Ainda em 1968 duas descobertas também fantásticas: a do pulsar de Vela (Large, Vaughan e Mills 1968) e a do pulsar do Caranguejo (*Crab,* em inglês: Staelin e Reifenstein, 1968), ambos localizados em restos de supernovas, conforme a predição de Baade e Zwicky. Com a descoberta de Sco X-1 e dos pulsares de Vela e do *Crab* as estrelas de nêutrons entraram definitivamente no vocabulário corriqueiro da Astrofísica.

Para finalizar esta introdução eu quero chamar atenção para um detalhe observacional importantíssimo sobre as estrelas de nêutrons: elas têm uma máxima massa possível, ou seja, não é possível, para uma estrela de nêutrons, ter massa maior do que, aproximadamente, 3 $M_\odot$. Como esse limite superior de massa é derivado (e se ele é de 3 ou 2,5 ou 2,2 $M_\odot$) é uma questão que está fora dos objetivos deste Capítulo.

7.5.1. Pulsares

É interessante notar como o desenvolvimento teórico do nosso conhecimento sobre as estrelas de nêutrons está povoado de trabalhos *proféticos*! Foi assim também com o trabalho de Franco Pacini (italiano, nascido em 1939) em 1967 (Pacini, 1967). Pacini previu que uma estrela de nêutrons em rotação, cujo eixo do campo magnético (assumido dipolar) não coincida com o eixo de rotação, deve emitir uma intensa radiação pulsada, na faixa de rádio.

Quase imediatemante após essa previsão, como vimos, Jocelyn Bell descobriu o primeiro pulsar rádio. Hoje temos mais de 1200 pulsares conhecidos (ver Figura 2).

Pulsares rádio são extremamente importantes para a astronomia. O estudo detalhado desses sistemas nos fornece as melhores determinações para as massas das estrelas de nêutrons (ver Figura 4), um parâmetro importantíssimo para a física de partículas, já que, uma vez que o raio seja conhecido (admitamos que o raio de uma estrela de

nêutrons é da ordem de 15 km) com a determinação da massa nós podemos conhecer a densidade média das estrelas de nêutrons e, daí, elaborarmos modelos para o comportamento da matéria a altas densidades.

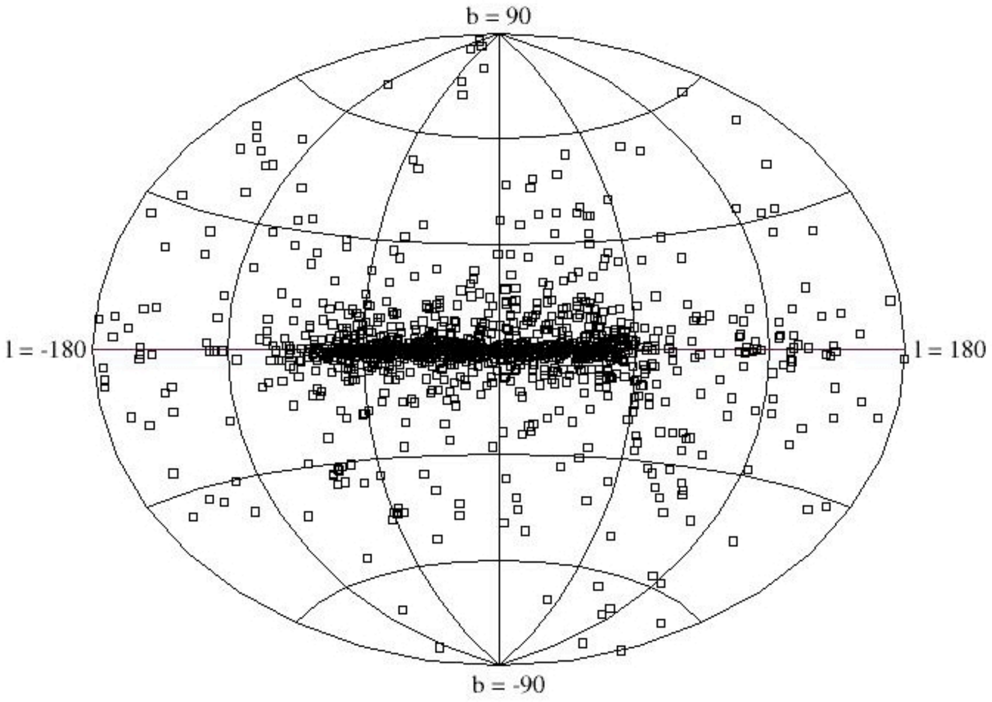

FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO (EM COORDENADAS GALÁCTICAS) DOS 1300 PULSARES CONHECIDOS (ATÉ FEVEREIRO DE 2004). DADOS OBTIDOS DE http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/

Os pulsares rádio também forneceram a melhor evidência (indireta) que dispomos até hoje da existência de ondas gravitacionais, previstas pela teoria geral da relatividade de Einstein. Estudando o sistema PSR B1913+16, Russel Hulse (americano, nascido em 1950) e Joseph Taylor (americano, nascido em 1941) puderam verificar que o tempo de chegada do pulso de um dos dois pulsares constituintes do sistema chegava sempre cada vez mais adiantado em relação ao observado anteriormente: em outras palavras, a diferença temporal entre a chegada de dois pulsos consecutivos é cada vez menor (Figura 3).

Esta diminuição temporal é totalmente compatível com um modelo que prevê que a emissão de ondas gravitacionais. Por este trabalho, Hulse e Taylor foram laureados com o Nobel de física em 1993.

7.5.2. Binárias de raios-X

Enquanto que nos pulsares a fonte de energia é a energia de rotação da estrela de nêutrons, nos pulsares de raios-X a fonte de energia é gravitacional.

Nos pulsares de raios-X uma estrela de nêutrons suga matéria de uma estrela companheira normal (geralmente uma estrela da seqüência principal), se esta estrela companheira está em certas etapas de seu estágio evolutivo. O mecanismo de transferência de matéria pode se dar através de ventos

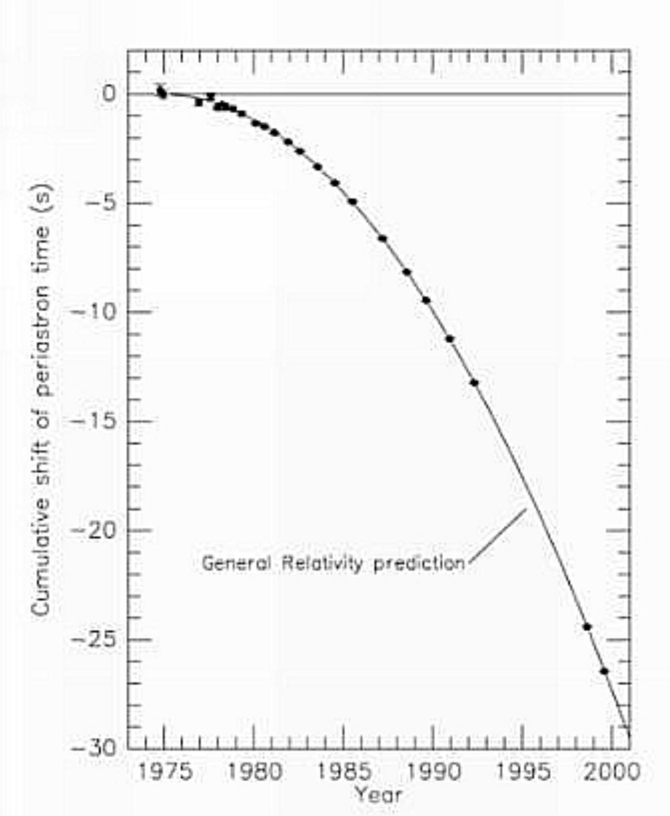

FIGURA 3 - DIFERENÇA OBSERVADA ENTRE TEMPOS CONSECUTIVOS DE CHEGADA DOS PULSOS EM PSR B1913+16. A CURVA CHEIA MOSTRA O MODELO QUE EXPLICA ESTAS DIFERENÇAS COM AJUDA DA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL.
FONTE: WEISBERG E TAYLOR, 2003.

estrelares ou por uma distorção esférica da estrela companheira (uma análise detalhada desses dois processos está fora dos objetivos deste texto). Por conservação de momento angular, em algumas situações, um *disco de acréscimo* é formado (analogamente ao caso das anãs brancas). Discos de acréscimo são uma excelente maneira de se emitir em

raios-X, faixa onde as binárias de raios-X são preferencialmente observadas. Reside exatamente aí a importância em se estudar esses sistemas, que são responsáveis pela emissão de parte dos fenômenos mais energéticos observados. Como se dá a produção de raios-X? Qual o espectro característico? Qual as regiões emissoras? Estas são algumas das (várias) linhas de pesquisa nesta classe de objetos .

Em algumas binárias de raios-X também é possível se fazerem determinação de massas. Embora com menos precisão do que no caso dos pulsares, estas determinações tem sua importância. Por exemplo (ver Figura 4) os sistemas binários denominados *Vela X-1* e *Cyg X-2* fornecem as únicas eviências experimentais de massas de estrelas de nêutrons que são maiores do que 1,5 $M_\odot$.

Vem também das binárias de raios-X as únicas determinações diretas de campos magnéticos em estrelas de nêutrons. Os valores obtidos fornecem campos da ordem de 10^{12} G, absolutamente concordantes com modelos de evolução estelar e com o que é estimado no caso dos pulsares rádio.

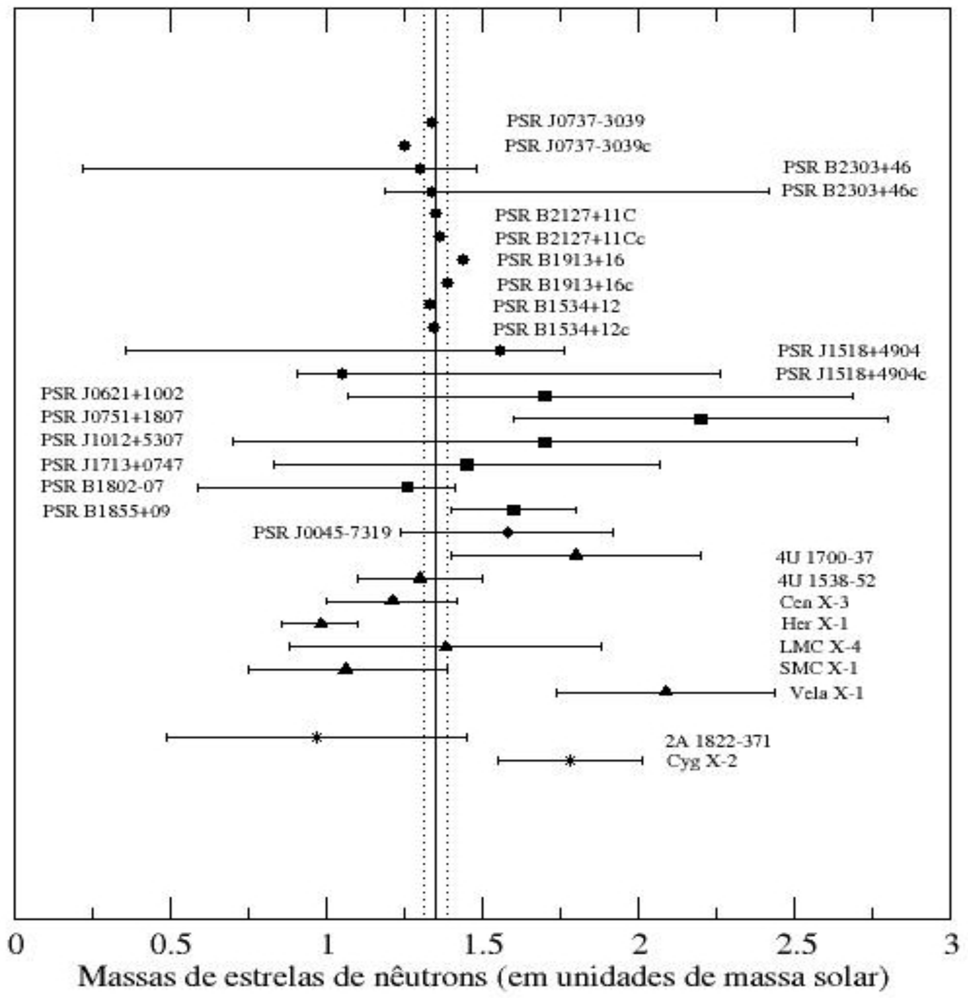

FIGURA 4. MASSAS DE ESTRELAS DE NÊUTRONS. OS CÍRCULOS SÃO SISTEMAS BINÁRIOS COM DUAS ESTRELAS DE NÊUTRONS; OS QUADRADOS SÃO SISTEMAS COM UMA ESTRELA DE NÊUTRONS E COM UMA ANÃ BRANCA; O LOSANGO É UM SISTEMA COM UMA ESTRELA DE NÊUTRONS E UMA ESTRELA DA SEQÜÊNCIA PRINCIPAL; TRIÂNGULOS E ASTERISCOS SÃO BINÁRIAS DE RAIOS-X. DADOS EXTRAÍDOS DE: THORSETT E CHAKRABARTY 1999, STAIRS ET AL. 2002, LYNE ET AL. 2004, SPLAVER ET AL. 2002, NAGASE 1989, ASH ET AL. 1999, QUAINTRELL ET AL. 2003, JONKER, VAN DER KLIS E GROOT 2003, NICE, SPLAVER E STAIRS 2004, OROSZ E KUULKERS 1999 E DE HTTP://WWW.JOHNSTONARCHIVE.NET/RELATIVITY/BINPULSETABLE.HTML

7.6. BURACOS NEGROS

Os buracos negros são, com certeza, os objetos astrofísicos que mais fascinam o publico leigo em Astrofísica. São objetos que cativam a curiosidade e a imaginação de todos que, um dia, ouviram falar de uma *estrela* tão densa que não deixa nem a luz escapar do seu potente campo gravitacional.

Como já vimos nas nossas seções anteriores sobre anãs brancas e estrelas de nêutrons, ambas têm uma máxima massa possível. O que acontece, então, com um objeto compacto que ultrapassa a maior massa permitida para uma estrela de nêutrons? A resposta, de acordo com a Teoria Geral da Relatividade, é de que nada impede o colapso. Com o procedimento gradual do colapso, o campo gravitacional perto do objeto torna-se cada vez mais intenso. Eventualmente, nada mais pode escapar do campo gravitacional do objeto para o mundo externo, nem mesmo a luz. Acaba de nascer um buraco negro. Toda a matéria está colapsada para o que chamamos de *singularidade*. Para podermos especular sobre física na reigão da singularidade, nós precisamos de uma teoria além da relatividade Geral. Esta teoria é a teoria quântica da gravitação que, efetivamente, não existe.

Exercício 5 - Expresse, dimensionalmente, uma fórmula para a densidade usando c, G e h. Qual o valor, em ordem de grandeza, da densidade obtida?

Eu nao vou resolver detalhadamente aqui, mas a fórmula seria algo como:

$$\rho \propto c^5\, G^{-2}\, h^{-1} \sim 10^{93}\ \mathrm{g\ cm^{-3}},$$

ou seja, uma teoria quântica da gravitação tem que responder neste regime de densidades!!!!!

Um buraco negro é definido simplesmente como uma região do espaço-tempo que não pode se comunicar com o universo externo. A região que separa o buraco negro do universo exterior (a última região da qual podemos extrair alguma informação) é chamada de h*orizonte de eventos*.

7.6.1. Histórico

Ainda em 1795, Pierre-Simon Laplace (francês, 1749-1827: Laplace 1795) notou que, como conseqüência da teoria corpuscular da luz de Newton e também da gravitação Newtoniana, a luz não poderia escapar do campo gravitacional de um objeto com massa grande e com raio pequeno. Apesar desta idéia trazer a *lembrança* da existência de um buraco negro, ela foi esquecida, mesmo após a formulação da teoria geral da relatividade!

Em Dezembro de 1915, somente um mês após a publicação dos artigos de Einstein sobre a teoria geral da relatividade, Karl Schwarzschild (alemão, 1873-1916: Schwarzschild 1916) derivou a solução analítica para o comportamento do campo gravitacional nas vizinhanças de um corpo (suposto esférico), sem rotação. Existem várias histórias sobre esta solução de Schwarzschild. Uma delas diz que, supostamente, Einstein escreveu a Schwarzschild dizendo que não esperava que suas equações tivessem solução (??!!). Há, entretanto, um forte indício contra essa *estória* que é uma carta que Einstein escreveu a Schwarzschild dizendo que achara esplêndida a solução dada. Apesar disso, nenhum dos dois se deu conta que estavam em mãos com as equações que descreviam o comportamento de um buraco negro esférico, não-rotacional e eletricamente neutro. Hoje em dia nós nos referimos a estes tipos (hipotéticos, eu posso adiantar) de buracos negros como *buracos negros de Schwarzschild*, em sua homenagem.

Em 1930 Chandrassekhar descobriu o limite superior de massa para uma anã branca, como já vimos. Em 1962, também como vimos, os pulsares foram descobertos, confirmando a existência das estrelas de nêutrons. Rapidamente, todos trabalhos históricos sobre colapso gravitacional que envolvia a teoria geral da relatividade prevendo a existência dos buracos negros foram resgatados (por exemplo: Oppenheimer e Snyder 1939, Kerr 1963). Em 1968, John Archibald Wheeler (americano, nascido em 1911) cunhou o termo *buracos negros*.

7.6.2. Detalhes Observacionais

Como nós podemos ter tanta certeza da existência dos buracos negros? Eu acho que a resposta dessa pergunta tem duas partes. Isto é, deixo claro, uma visão pessoal.

Primeiro, a existência dos objetos compactos eu creio ser uma prova forte da existência dos buracos negros. Vimos que uma estrela tem a capacidade de conter o colapso gravitacional por pressão de degenerescência de elétrons ou nêutrons dando origem, estas, as estrelas de nêutrons e àquelas as anãs brancas. Vimos, também, que existe uma massa superior possível tanto para as estrelas de nêutrons quanto para as anãs brancas. Toda essa formulação entra na teoria da evolução estelar e todas as partes se encaixam, fazendo da teoria de formação estelar um dos pilares da Astrofísica. A idéia dos buracos negros surge da soma do colapso gravitacional de uma estrela massiva, resultado da teoria de evolução estelar, com a teoria da relatividade geral. Novamente, neste caso, tudo se encaixa perfeitamente.

Segundo, a Natureza nos deu a sorte de poder observar alguns objetos compactos em sistemas binários, como as binárias de raios-X que eu descrevi anteriormente. A observação de raios-X é um dos indícios (apenas indícios, prestem atenção!) da presença de um objeto compacto em um sistema binário.

O que acontece, então, quando nós medimos a massa de um objeto compacto e esta massa é maior do que 4 $M_\odot$? Como, à luz do que estudamos sobre os objetos compactos até agora, vocês caracterizariam este objeto? A meu ver, mesmo que não possamos ver um buraco negro, pela própria natureza intrínseca desses objetos, é o nosso conhecimento das anãs branca, das estrelas de nêutrons, da teoria de evolução estrelar e da teoria da relatividade geral que torna a existência dos buracos negros tão fácil de ser entendida, tão natural de ser aceita.

7.7. CONCLUSÕES

Com este Capítulo eu espero que vocês tenham tido uma introdução ao tema dos objetos compactos. Como eu já deixei claro várias vezes, uma abordagem profunda e mais pormenorizada foi, propositadamente, deixada de lado. Existem vários temas que eu não mencionei aqui como, por exemplo, a existência de buracos negros supermassivos e a existência de estrelas de nêutrons com campos magnéticos superiores a 10^{12} G.

Considerem, assim, este Capítulo como a sua primeira leitura, introdutória sobre o tema. Eu espero que sirva como referência para pesquisas e leituras futuras.

7.8. BIBLIOGRAFIA

Adams, W. S. 1915, PASP, 27, 236.

Baade, W., e Zwicky, F. 1934, Phys. Rev., 45, 138.

Chandrassekhar, S. 1931, ApJ, 74, 81.

Fowler, R. H. 1926, MNRAS, 87, 114.

Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., Rossi, B. B. 1962, Phys. Rev. Lett., 9, 439

Glendenning, N. K. “Compact Stars: Nuclear Physics, Particle Physics and General Relativity (second edition)”, Springer, 2000.

Heap, S. R., e Corcoran, M. F. 1992, ApJ, 387, 340.

Hewish, A., et al., 1968, Nature, 217, 709.

Jonker, P. G., van der Klis, M., e Groot, M. 2003. MNRAS, 339, 663.

Laplace, P. S. ``Le Système du Monde", Vol II, Paris (edição inglesa: "The System of the World", editado pela W. Flint de Londres, 1809), 1795.

Large, M. I., Vaughan, A. E., e Mills, B. Y. 1968, Nature, 220, 340.

Lyne, A. G., et al. 2004, Science, 303, 1153

Nagase, F. 1989, PASP, 41, 1.

Nice, D. J., Spaver, E. M., e Stairs I. H. Em “Young Neutron Stars and their environment (IAU Symp. Vol 218”, F. Camilo e B. M. Gaensler (eds.), no prelo (ver astro-ph/0311296).

Oppenheimer, J. R., e Volkoff, G. M. 1939, Phys. Rev., 55, 374.

Orosz, J., e Kuulkers, E. 1999, MNRAS, 305, 132.

Pacini, F. 1967, Nature, 216, 567.

Reynolds, A. P., Bell, S. A., e Hilditch, R. W. 1992, MNRAS, 256, 631.

Schwarschild, K. 1916. *Sitzungsber. Dtsch. Akad. Wiss. Berlin, Kl. Math. Phys. Tech.*, p. 189 (texto original em alemão).

Shapiro, S. L., e Teukolsky, S. A. 1983 "Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars: the physics of compact objects", John Wiley & Sons, 1983.

Splaver, E. M. et al. 2002, ApJ, 581, 509.

Staelin, D. H., e Reifenstein, E. C. 1968, Science, 162, 1481.

Stairs, I. H. et al. 2002, ApJ, 581, 501.

Thorsett, S. E., e Chakrabarty, D. 1999, ApJ, 512, 1988.

Weisberg, J. M, e Taylor, J. H. 2003 em "Radio Pulsars". ASP Conference Proceedings, Vol. 302, M. Bailes, D. J. Nice , e S. E. Thorsett (eds). Astronomical Society of the Pacific Press, p.93.

Capítulo 8

GALÁXIAS

Carlos Alexandre Wuensche

Revisado em 2017

GALÁXIAS

LISTA DE FIGURAS 4

LISTA DE TABELAS.. 6

8.1. INTRODUÇÃO 7

8.2. A ESTRUTURA DA NOSSA GALÁXIA 8

8.3. AS FORMAS CONHECIDAS: ESPIRAIS, ELÍPTICAS E IRREGULARES 12

8.4. A FORMAÇÃO DAS GALÁXIAS 15

8.5. RADIOGALÁXIAS E QUASARES.. 17

8.6. A ESCALA DE DISTÂNCIA COSMOLÓGICA 25

8.6.1. HIERARQUIAS.. 26

8.6.2. DISTÂNCIAS TÍPICAS 28

8.7. REFERÊNCIAS.. 29

LISTA DE FIGURAS

Figura 8.1 – Vista representativa da estrutura da nossa Galáxia, com o disco representado em branco. O halo tem uma forma circular e circunda todo o disco. A distância do Sistema Solar ao centro da Galáxia está representada do lado esquerdo da figura inferior: ~ 30 mil anos luz (Ref: http://www.star.le.ac.uk/edu/mway). 7

Figura 8.2 – M45, um dos mais brilhantes e próximos aglomerados abertos conhecido. Também conhecido como Plêiades, ele contém cerca de 3000 estrelas e encontra-se a ~ 400 anos-luz da Terra. (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod). 9

Figura 8.3 – Messier 80, um dos 147 aglomerados globulares conhecidos na Galáxia, localizado a 28,000 anos-luz da Terra, M80 contem centenas de milhares de estrelas, ligadas por sua atração gravitacional mútua (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod)... 10

Figura 8.4 – Emissão de rádio no comprimento de onda de 21 cm, produzida por hidrogênio neutro, e usada para mapear os braços espirais da Via Láctea.................... 11

Figura 8.5 – Mapa de emissão sincrotron feito por Haslam e colaboradores. A freqüência de observação é 408 MHz e o plano da Galáxia é a faixa escura, situada no centro do mapa. Nesse mapa não se observa estrelas individuais, mas radiofontes extensas e restos de supernovas (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod). 12

Figura 8.6 – Galáxia elíptica E0, E3 e E0. Note-se o gradual aumento de excentricidade da esquerda para a direita. 14

Figura 8.7 – Galáxias espirais Sa, Sb e Sc, com a clara variação na forma e estrutura dos braços. Note-se a ausência, nessa foto, de espirais com barra....................................... 14

Figura 8.8 – Diagrama de Hubble para classificação de galáxias regulares (Fonte: Shu, pág. 294). 14

Figura 8.9 – Imagens de galáxias S0. Note a presença de uma barra no objeto à direita (Sb0). 15

Figura 8.10 – Da esquerda para a direita, Grande Nuvem e Pequena Nuvem de Magalhães. 15

Figura 8.11 – De cima para baixo, vemos uma nuvem de gás em expansão; no centro a nuvem começa a colapsar sob o efeito da matéria concentrada no seu interior. Embaixo, estrelas de população II são formadas no núcleo. As regiões externas do globo caem para o centro e criam um disco de gás em rotação onde estrelas de população I irão, futuramente, se formar (Ref. Adaptada de Seeds, 2000).. 17

Figura 8.12 – Representação de um núcleo ativo de galáxia (AGN). O feixe perpendicular (acima e abaixo) ao disco são emissões de alta intensidade, causadas provavelmente pela aceleração de partículas pelo campo magnético do AGN. O objeto à direita é Centaurus A, o núcleo ativo de galáxia mais próximo. Cen A é uma galáxia elíptica gigante, localizada a cerca de 10 milhões de anos luz da Terra. A figura

combina uma imagem óptica com linhas escuras traçando os lobos de emissão em rádio (equivalentes aos jatos do desenho à esquerda) e uma imagem infravermelho superposta (em vermelho) feita pelo satélite ISSO.. 18

Figura 8.13 – Mapa em rádio de Cignus A, uma radiofonte clássica. A imagem central (na forma de uma pequena borboleta) representa a região emissora no óptico. As duas estruturas simétricas em relação ao centro são os chamados lobos emissores e emitem uma enorme quantidade de energia na faixa de rádio. O tamanho típico dessas estruturas em rádio é da ordem de alguns milhões de anos-luz. 20

Figura 8.14 – Relação redshift x distância para diversas fontes extragalácticas. As flechas à direita indicam o deslocamento das linhas H e K do cálcio (Cortesia do Observatório Palomar).. 21

Figura 8.15 – Posição das linhas de emissão do H observadas em quasares típicos. As linhas horizontais em $H_{\alpha, \beta, \chi, \delta}$ representam a magnitude do deslocamento, em unidades de comprimento de onda. 22

Figura 8.16 – Regiões hospedeiras de quasares. 23

Figura 8.17 – Imagens superpostas do quasar 3C 219. No centro encontramos a componente óptica, observado no óptico. Observe o jato fraco de matéria saindo da fonte (parte central da imagem). À mesma fonte medida em rádio mostra o forte jato, com o formato aproximado de um taco de beisebol na parte inferior direita da figura.. 24

Figura 8.18 – A distribuição de galáxias no Universo próximo feita pelo 2dF Survey (http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS). 27

LISTA DE TABELAS

TABELA 8. 1 – Diversos tipos de galáxias ativas e suas características principais 24

TABELA 8.2 – Escala do Universo conhecido (Adaptada de Ferris, pág. 225) 28

8.1. INTRODUÇÃO

Numa noite escura e longe das luzes da cidade, vemos que, independente de que região na Terra estivermos, é notável a existência de uma faixa concentrada de estrelas que cruza o céu. Essa faixa é chamada de Via Láctea: a Galáxia onde nosso Sistema Solar está localizado. A forma mais simples de perceber que a Via Láctea é uma galáxia é observar a emissão rádio ao longo do plano; a faixa de estrelas que vemos no céu é o plano da Galáxia. Veja um esboço da sua estrutura na Figura 8.1.

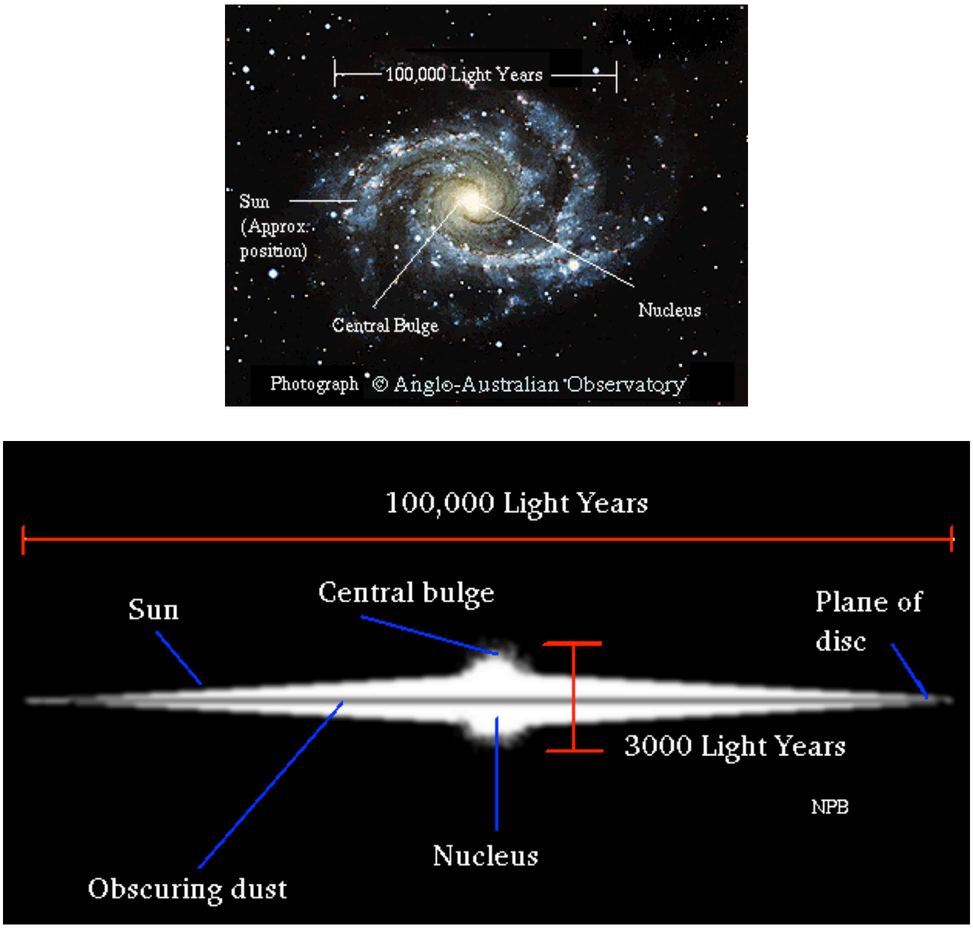

Figura 8. 1 – Vista representativa da estrutura da nossa Galáxia, com o disco representado em branco. O halo tem uma forma circular e circunda todo o disco. A distância do Sistema Solar ao centro da Galáxia está representada do lado esquerdo da figura inferior: ~ 30 mil anos luz (Ref: http://www.star.le.ac.uk/edu/mway).

Ela possui a forma de uma espiral, sobre a qual falaremos nessa seção e é constituída de um disco com um núcleo (a região do plano) e um halo com a forma aproximadamente esférica que envolve o disco.

8.2. A ESTRUTURA DA NOSSA GALÁXIA

Somente podemos ver a olho nu a faixa de estrelas que constituem o disco da Galáxia, mas existem outros dois componentes tão importantes quanto as estrelas: o gás interestelar e a poeira. Vamos então discutir qual é a forma da nossa Galáxia. Conforme mencionamos, podemos entender a forma da Galáxia se pensarmos num disco com um bojo no centro, envolvido por um halo esférico. O diâmetro desse disco, estimado através das medidas de hidrogênio através do plano, é da ordem de 100000 anos luz. A espessura do disco é muito menor, da ordem de 2000 anos luz. O nosso Sistema Solar encontra-se a cerca de 30000 anos luz do centro da Galáxia, num dos braços espirais.

Como visto no capítulo sobre as estrelas, ao observarmos as estrelas notamos que a imensa maioria delas se distribui ao longo da seqüência principal no diagrama HR. Tipicamente, as estrelas podem ser divididas em dois grupos: tipo I, que caracteriza as estrelas mais jovens e com composição química mais heterogênea (formadas de hidrogênio, hélio e uma fração de elementos mais pesados que os dois), e tipo II, as mais antigas, com composição química mais homogênea (praticamente só hidrogênio e hélio), semelhante à da nuvem-mãe que deu origem à Galáxia. As estrelas mais jovens acabam, pela estrutura dos braços espirais e gravidade local, concentrando-se em regiões próximas do plano. As estrelas mais antigas estão principalmente localizadas em aglomerados globulares, espalhados pelo halo.

Essa concentração de estrelas em aglomerados é normal e observada na nossa e em outras galáxias. Aglomerados estelares são extremamente importantes no estudo da evolução estelar e galáctica. Objetos formados em aglomerados possuem tipicamente a mesma composição química, a mesma idade e estão situados aproximadamente à mesma distância de nós. Então, estudar as estrelas em aglomerados nos permite ver objetos em estágios evolutivos diferentes, mas que foram formados a partir das mesmas condições iniciais. Classificamos os aglomerados em abertos e globulares. Aglomerados abertos estão concentrados no disco e contém, em média, 100 objetos, quase que só do

tipo I. Eles são um grupo esparso, cujas componentes estão ligeiramente ligadas pela gravidade. Exemplos clássicos de aglomerados abertos são as Plêiades (Figura 8.2) e as Híades (na constelação de Touro).

Figura 8.2 – M45, um dos mais brilhantes e próximos aglomerados abertos conhecido. Também conhecido como Plêiades, ele contém cerca de 3000 estrelas e encontra-se a ~ 400 anos-luz da Terra. (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod).

Já os aglomerados globulares (Figura 8.3), mencionados no parágrafo anterior, são fortemente ligados pela gravidade, possuem uma forma esférica bem definida (com raio da ordem de uns 100 anos luz) e contém cerca de 100000 estrelas. A maioria das estrelas componentes são do tipo II.

Vamos olhar agora para os outros componentes das galáxias: as nuvens de gás e poeira. As nuvens de gás interestelar são uma espécie de resíduo do processo de formação das estrelas. Regiões espalhadas pela nuvem se condensam e dão origem às estrelas; o gás que resta após o processo de formação continua espalhado entre as estrelas e "confinado" ali pela força da gravidade. A existência de nuvens ao longo do plano da Galáxia e em seus braços é responsável pelo obscurecimento (absorção da luz emitida pelas estrelas mais distantes) ao longo do plano. Partículas de poeira cósmica são também responsáveis pelo obscurecimento ao longo do plano Galáctico na faixa óptica. O tamanho dos grãos de poeira é da ordem de alguns milésimos de milímetros e emitem principalmente radiação infravermelha. Essa emissão é uma forma de reprocessamento

da luz visível, absorvida pelos grãos, utilizada para aquecê-los e depois retransmitida no infravermelho.

Figura 8.3 – Messier 80, um dos 147 aglomerados globulares conhecidos na Galáxia, localizado a 28,000 anos-luz da Terra, M80 contem centenas de milhares de estrelas, ligadas por sua atração gravitacional mútua (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod).

O astrônomo Robert Trumpler mostrou, em meados da década de 30, que poeira e gás eram responsáveis pelo obscurecimento do plano Galáctico. Vemos uma grande quantidade de estrelas espalhadas pelo plano, mas não conseguimos ver outras galáxias através dele exatamente por essa razão. Ao olhar para fora do plano, vemos menos estrelas e mais galáxias distantes. Trumpler mostrou que a luz emitida pelas estrelas é reduzida pela metade a cada 3000 anos luz percorridos ao longo do plano galáctico. Assim a radiação emitida do centro da Galáxia chega até nós (localizados a 30000 anos luz do centro) com uma intensidade $(1/2)^{10}$, ou seja, aproximadamente 0,001 vezes a intensidade inicial, devido à absorção pelas nuvens de gás e poeira. Como sabemos então que ela tem a forma de uma espiral, com braços ao redor de um núcleo? Mapeamos a estrutura de “disco + halo”, mencionada no começo dessa seção, utilizando a emissão rádio e infravermelho, cujos comprimentos de onda são pouco absorvidos, para traçar o contorno da Galáxia usando medidas nos braços espirais (Figura 8.4).

Figura 8.4 – Emissão de rádio no comprimento de onda de 21 cm, produzida por hidrogênio neutro, e usada para mapear os braços espirais da Via Láctea

A Figura 8.5 mostra um mapa de emissão sincrotron de todo o céu, com destaque para o plano da nossa Galáxia, feito na freqüência de 408 MHz. Esse mapa, feito por Haslam e colaboradores, é famoso por ter sido montado a partir da combinação de medidas em diversos telescópios ao longo de 15 anos. A maior parte da emissão concentra-se no plano da Via Láctea (que tem a forma de uma "corcova") e um bom número de radiofontes individuais dentro e fora da Galáxia aparecem também na figura.

Figura 8.5 – Mapa de emissão sincrotron feito por Haslam e colaboradores. A freqüência de observação é 408 MHz e o plano da Galáxia é a faixa escura, situada no centro do mapa. Nesse mapa não se observa estrelas individuais, mas radiofontes extensas e restos de supernovas (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod).

8.3. AS FORMAS CONHECIDAS: ESPIRAIS, ELÍPTICAS E IRREGULARES

A maior parte das galáxias possui características que permitem classificá-la como espirais ou elípticas. Galáxias elípticas possuem uma aparência oval e algumas são quase esféricas. Elas apresentam núcleos brilhantes com regiões externas mais tênues e não possuem uma borda claramente definida. Tipicamente quase não contém gás ou poeira, a matéria prima que permite a formação contínua de estrelas e são formadas, em grande maioria, por estrelas de população II (velhas).

A faixa de massa e tamanho das galáxias elípticas é grande, cobrindo desde anãs (pouco maiores que um aglomerado globular) até raras gigantes (como M87) e supergigantes, com mil vezes a massa da nossa galáxia e cerca de 500000 anos luz de diâmetro. A maioria das galáxias (mais de 60%) é elíptica, em grande parte galáxias anãs. Na classificação de galáxias, as elípticas são identificas pela letra E seguida de um número que define os diversos tipos de elípticas.

Galáxias espirais, como a nossa, têm discos com núcleos e halos difíceis de serem vistos principalmente por causa do brilho do núcleo e do disco. Como o disco e os braços

espirais são constituídos de estrelas de população I, jovens, e contém bastante gás e poeira, especialmente nos braços, elas possuem uma taxa alta de formação de estrelas, que explica esse brilho. Já o halo é constituído de uma população de estrelas tipo II. Os braços espirais estão enrolados em torno do núcleo, dando não mais do que uma volta ao seu redor. As galáxias espirais formam duas seqüências separadas: as espirais barradas (Sb) e as espirais normais (S). Espirais normais são subdivididas em Sa (núcleos grandes e pequenos braços enrolados), Sb (núcleos menores e braços mais soltos) e Sc (núcleos bem pequenos e braços quase "desacoplados" do núcleo). Cerca de um terço das galáxias espirais observadas são barradas e sua subclassificação é a mesma: SBa, SBb e SBc. A razão da existência da barra ainda não é bem entendida pelos astrônomos. Seu intervalo de massa e tamanho é bem menor que o notado nas elípticas, variando entre 100 e algumas centenas de bilhões de vezes a massa do Sol.

As Figuras 8.6 e 8.7 mostram fotos de galáxias elípticas e espirais. Nota-se claramente a diferença em suas estruturas. Entretanto, não se tem uma ideia clara do porquê da existência dos braços espirais, ou melhor, da forma espiral. O dilema dos braços (como se formaram? Por que não se enrolam ao redor do núcleo da galáxia?) vem sendo estudado desde o início do século e a sugestão mais aceitável, dada pelo astrônomo sueco Bertil Lindblad e aperfeiçoada pelo matemático americano C.C. Lin, é que os braços das galáxias espirais são "cristas" de uma onda de densidade. Cada período dessa onda é da ordem de algumas dezenas de milhões de anos. Coincidentemente, esse é o tempo de vida das estrelas tipo O e B presentes nos braços das espirais.

Edwin Hubble classificou os vários tipos de galáxias em um diagrama semelhante a um diapasão, onde as elípticas formam um grupo em um dos lados do diapasão e as espirais são divididas no "garfo" (Figura 8.8). A classificação é baseada na aparência das galáxias. Na junção dos três braços, Hubble colocou o tipo S0, que é bastante estranho e combina propriedades de ambos os tipos (Figura 8.9). Elas tem a forma e o disco das espirais, mas não tem gás e poeira que permitem a formação de estrelas. A velocidade de rotação e a quantidade de poeira crescem das elípticas para as espirais. Apesar dessas diferenças, não existe nenhuma evidência que um tipo de galáxia evolui para o outro. Provavelmente as características que mencionamos aqui são todas determinadas nos instantes de formação de cada uma.

Figura 8.6 – Galáxia elíptica E0, E3 e E0. Note-se o gradual aumento de excentricidade da esquerda para a direita.

Figura 8.7 – Galáxias espirais Sa, Sb e Sc, com a clara variação na forma e estrutura dos braços. Note-se a ausência, nessa foto, de espirais com barra.

Figura 8.8 – Diagrama de Hubble para classificação de galáxias regulares (Fonte: Shu, pág. 294).

Figura 8.9 – Imagens de galáxias S0. Note a presença de uma barra no objeto à direita (Sb0).

Uma pequena percentagem de galáxias estudadas não se encaixa nas classificações acima, sendo então denominadas irregulares (Irr). Nossas vizinhas mais próximas, a Pequena e a Grande Nuvem de Magalhães são exemplos típicos de galáxias irregulares (Figura 8.10).

Figura 8.10 – Da esquerda para a direita, Grande Nuvem e Pequena Nuvem de Magalhães.

Existem ainda galáxias compactas e extremamente brilhantes e densas descobertas por Fritz Zwicky e, ainda, outras que apresentam formas distorcidas e estranhas. Em alguns casos essas formas podem ser explicadas por interação com algum objeto próximo (galáxias vizinhas), mas em outros a causa da distorção é, simplesmente, desconhecida.

8.4. A FORMAÇÃO DAS GALÁXIAS

As galáxias devem ter sido criadas há bilhões de anos atrás. Tanto quanto sabemos, todas elas possuem estrelas de população tipo II, logo sua idade deve ser de, pelo menos, uns 10 a 11 bilhões de anos, que é a idade típica das estrelas de população II. O Universo hoje é muito velho para formar novas galáxias, porque o gás espalhado entre as galáxias e aglomerados possui uma densidade muito baixa para formar novas estruturas. A densidade média de uma galáxia é da ordem de um átomo por centímetro

cúbico. Essa seria a densidade se todas as estrelas fossem dissolvidas e espalhadas uniformemente pelo volume da galáxia.

Embora extremamente baixa para os nossos padrões (a densidade do nosso corpo é de 1 $g.cm^{-3}$, ou $1x10^{24}$ átomos por centímetro cúbico), essa densidade ainda é cerca de um milhão de vezes maior do que a densidade do Universo hoje (cerca de 10^{-30} $g.cm^{-3}$). Entretanto, quando o sistema solar se formou a densidade do Universo era cerca de 10 vezes maior do que a densidade de hoje. Quando o Universo tinha cerca de 10 milhões de anos, sua densidade era cerca de um milhão de vezes maior do que hoje (um átomo de hidrogênio por centímetro cúbico) e as galáxias ainda estavam em processo de formação.

Basicamente, a teoria de formação e evolução das galáxias envolve uma participação importante da força gravitacional. A teoria do colapso sugere que galáxias, da mesma forma que estrelas, formaram-se a partir de uma nuvem de hidrogênio e hélio, ambos criados nos primeiros instantes de vida do Universo (mais precisamente, nos três primeiros minutos). Inicialmente, essas nuvens se expandiam junto com a expansão do próprio universo; depois de um certo tempo, a atração gravitacional de uma região um pouco mais densa dentro da nuvem fez com que ela se expandisse mais lentamente. Finalmente, após alguns milhões de anos, ao invés de continuar a expansão, a nuvem começou a se contrair e a separação entre diferentes nuvens foi aumentando. A Figura 8.11 mostra como esse processo provavelmente ocorreu.

A maioria das galáxias aparentam ser entidades independentes, interagido umas com as outras devido à força gravitacional. Isso é uma “ilusão” causada pela impossibilidade de telescópios observarem a enorme quantidade de gás existente entre as galáxias. Uma enorme quantidade de gás parece existir em todos os aglomerados de galáxias e sua presença é notada devido à emissão de raios X, que ocorre quando o gás é acelerado pelo campo gravitacional das galáxias.Durante o processo evolutivo, colisões dos mais diversos tipos devem acontecer entre galáxias, algumas bastante dramáticas, especialmente quando galáxias espirais estão envolvidas. Grupos e aglomerados certamente são afetados pela força gravitacional dos outros componentes e, muitas vezes, ocorre a fusão de duas galáxias para formar uma galáxia gigante ou, quando o

evento é muito violento, uma onda de choque pode romper a estrutura estável e destruir as galáxias envolvidas na colisão.

8.5. RADIOGALÁXIAS E QUASARES

O início da observação do Universo na faixa de rádio do espectro eletromagnético ocorreu na década de 30 com Karl Jansky e Grote Reber. A partir do final da II Guerra Mundial, radiotelescópios começaram a ser construídos na Inglaterra e Austrália e hoje, grande parte da pesquisa feita sobre o Universo distante é possível porque a emissão em rádio é capaz de viajar grandes distâncias sem sofrer nenhum tipo de absorção no meio intergaláctico.

Figura 8.11 – De cima para baixo, vemos uma nuvem de gás em expansão; no centro a nuvem começa a colapsar sob o efeito da matéria concentrada no seu interior. Embaixo, estrelas de população II são formadas no núcleo. As regiões externas do globo caem para o centro e criam um disco de gás em rotação onde estrelas de população I irão, futuramente, se formar (Ref. Adaptada de Seeds, 2000)

Centenas de radiofontes foram descobertas nos últimos 50 anos e a grande maioria delas foi associada a um objeto também visível no óptico. Assim, Taurus A (a fonte mais intensa observada na constelação de Touro) foi associada à nebulosa do Caranguejo, uma nuvem de gás produzida por uma explosão de supernova em 1054 DC. Cignus A (ou 3C 405) foi identificada com uma galáxia gigante a cerca de UM BILHÃO de anos luz. A maior parte das fontes de rádio muito intensas também visíveis no óptico são galáxias e emitem milhões de vezes mais energia em rádio que a nossa galáxia. Elas emitem mais energia em rádio do que na faixa visível e, normalmente, são galáxias elípticas gigantes, em geral os objetos mais brilhantes dos aglomerados de galáxias. O mecanismo responsável por essa enorme geração de energia é chamado de ***emissão sincrotron***. As ondas de rádio são emitidas por elétrons livres que se movem numa trajetória espiral em torno de campos magnéticos nessas radiofontes (Figura 8.12). Os elétrons possuem energias muito grandes, mas, paradoxalmente, os campos magnéticos que os aprisionam são muito mais fracos que o campo magnético terrestre.

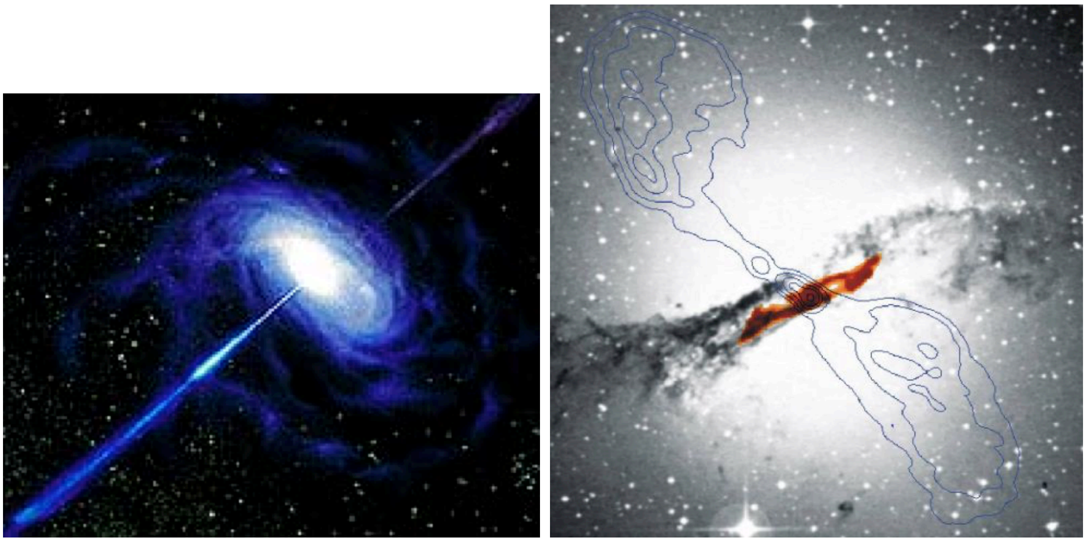

Figura 8.12 – Representação de um núcleo ativo de galáxia (AGN). O feixe perpendicular (acima e abaixo) ao disco são emissões de alta intensidade, causadas provavelmente pela aceleração de partículas pelo campo magnético do AGN. O objeto à direita é Centaurus A, o núcleo ativo de galáxia mais próximo. Cen A é uma galáxia elíptica gigante, localizada a cerca de 10 milhões de anos luz da Terra. A figura combina uma imagem óptica com linhas escuras traçando os lobos de emissão em rádio (equivalentes aos jatos do desenho à esquerda) e uma imagem infravermelho superposta (em vermelho) feita pelo satélite ISSO.

Atualmente, com os modernos radiotelescópios, é possível estudar em detalhes a estrutura das radiofontes e descobriu-se algo bastante interessante sobre sua forma geral. A maioria delas tem uma estrutura “dupla” e a emissão de rádio localiza-se principalmente nas extremidades dessa estrutura, em regiões que chamamos de componentes extensas (Figura 8.13). Elas encontram-se separadas por centenas de milhares de anos luz e a radiogaláxia situa-se entre ambas as componentes. Freqüentemente a região central é também uma radiofonte que também contém duas componentes emissoras separadas tipicamente por somente algumas centenas de anos luz. Dividimos então as radiofontes em extensa (as estruturas externas) e compactas (as regiões na própria radiogaláxia).

Os quasares foram inicialmente identificados como radiofontes fracas e, posteriormente, como estrelas estranhas na nossa própria Galáxia que eram fortes emissoras de rádio. A descoberta de sua real natureza aconteceu em 1963, quando Marteen Schimdt descobriu que as linhas espectrais do objeto 3C 273 estavam deslocadas de sua posição original no laboratório de cerca de 16%, na direção de comprimentos de onda mais longos. Em outras palavras, a fonte tinha um desvio para o vermelho (ou “redshift”) de 0,16 e estava se afastando de nós com uma velocidade de 16/100 da velocidade da luz. Nota-se, na Figura 8.14, a diferença entre as posições das linhas no espectro de diversas galáxias distantes e as posições das linhas H e K do cálcio, deslocadas em função da distância.

Figura 8.13 – Mapa em rádio de Cignus A, uma radiofonte clássica. A imagem central (na forma de uma pequena borboleta) representa a região emissora no óptico. As duas estruturas simétricas em relação ao centro são os chamados lobos emissores e emitem uma enorme quantidade de energia na faixa de rádio. O tamanho típico dessas estruturas em rádio é da ordem de alguns milhões de anos-luz.

Por hora, é interessante comentar que um desvio para o vermelho de 0,16 corresponde, grosseiramente, a uma distância de 2 bilhões de anos-luz. Depois disso, muitas outras radiofontes foram identificadas como objetos semelhantes à estrelas, mas com grande desvio para o vermelho. O nome QUASAR vem da contração de QUASI-STELLAR RADIO SOURCE e está hoje associado a fontes remotas que emitem grandes quantidades de energia e que apresentam um grande desvio para o vermelho em suas linhas espectrais (Figura 8.15).

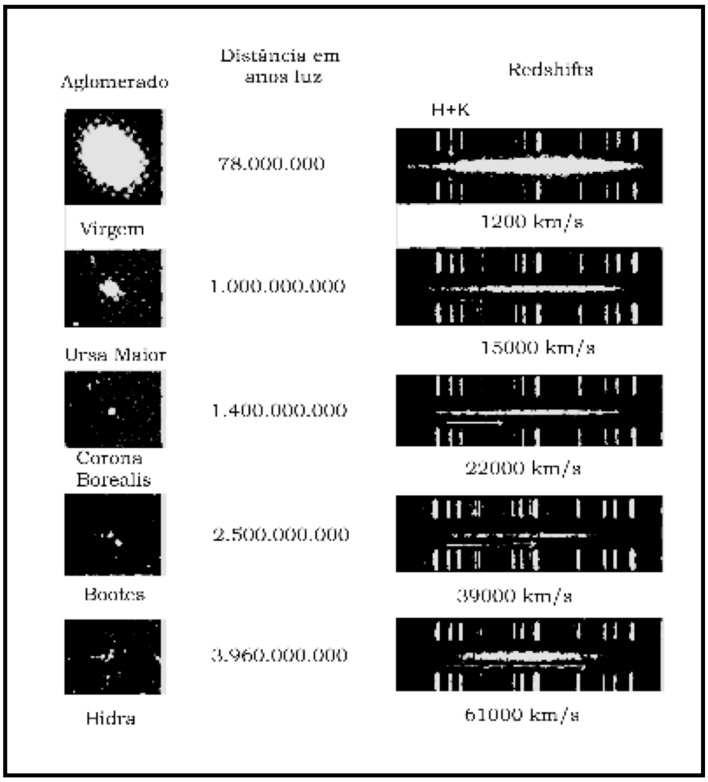

Figura 8.14 – Relação redshift x distância para diversas fontes extragalácticas. As flechas à direita indicam o deslocamento das linhas H e K do cálcio (Cortesia do Observatório Palomar).

Mas o que são os quasares? Ainda não se tem uma resposta satisfatória para essa pergunta... a resposta mais aceita (mas absolutamente não unânime) é que eles são objetos semelhantes a galáxias, mas localizados a distâncias MUITO maiores. E, para aparecerem no céu com o aspecto de estrelas fracas, mas situados a distâncias tão grandes, sua taxa de geração de energia deve ser fenomenal! Além disso, os quasares apresentam uma variação, às vezes regular, na emissão de radiação que é notável em alguns poucos dias (no óptico) ou mesmo horas (em raios X) de observação. Como a variabilidade na emissão de um objeto não pode acontecer num tempo menor do que a luz leva para se propagar de um lado a outro desse mesmo objeto, a variação na luminosidade emitida nos dá uma estimativa do tamanho dele.

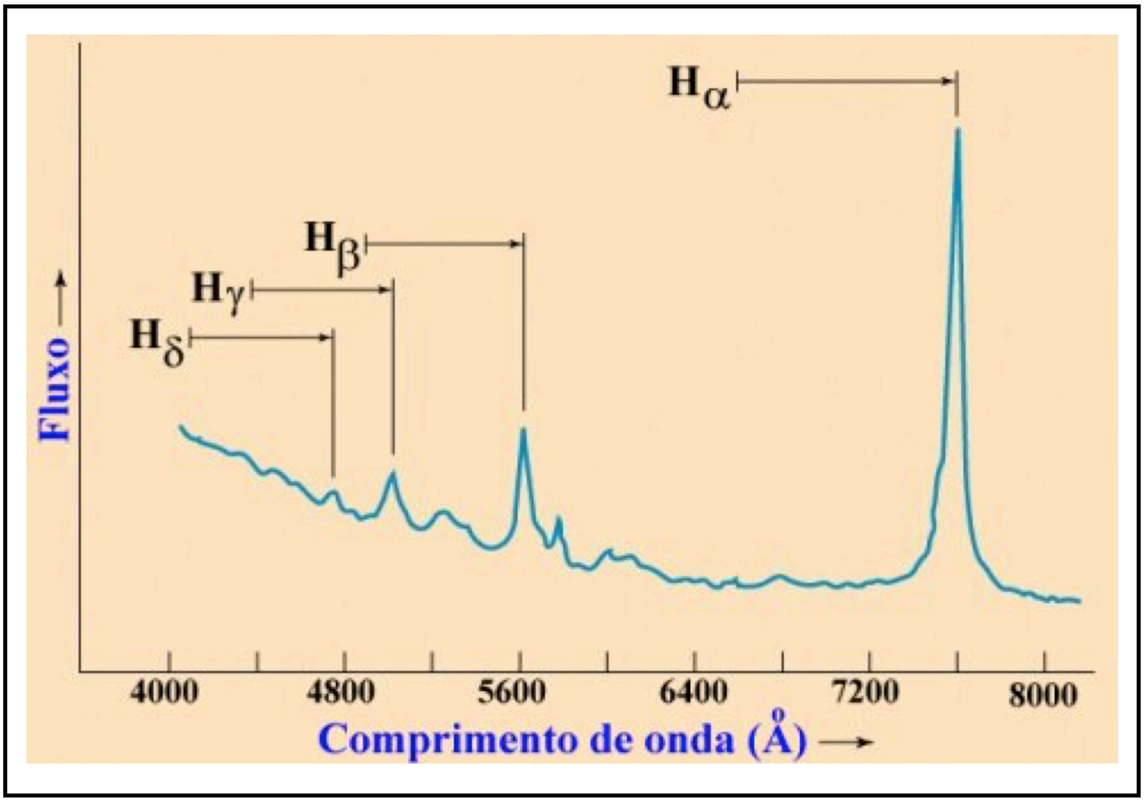

Figura 8.15 – Posição das linhas de emissão do H observadas em quasares típicos. As linhas horizontais em $H_{\alpha, \beta, \chi, \delta}$ representam a magnitude do deslocamento, em unidades de comprimento de onda.

Observações de quasares na faixa de raios X e uma interpretação cosmológica (associada à idade e à distância que tais objetos se encontram) sugerem que o núcleo de um quasar deve ter o tamanho aproximado do nosso sistema solar, mas emitindo uma energia cerca de 10 trilhões de vezes maior que a do Sol. É natural, portanto, que essa hipótese não seja um consenso entre astrônomos, devido à sua desproporção.

Os quasares são bastante semelhantes às radiogaláxias e também podem ter componentes compactas ou extensas. Na verdade, nem sempre os astrônomos conseguem distinguir perfeitamente entre um quasar e o núcleo brilhante de uma radiogaláxia (Figura 8.16). Possivelmente quasares e núcleos de radiogaláxias são o mesmo objeto, que se comporta de forma diferente ao longo de sua evolução.

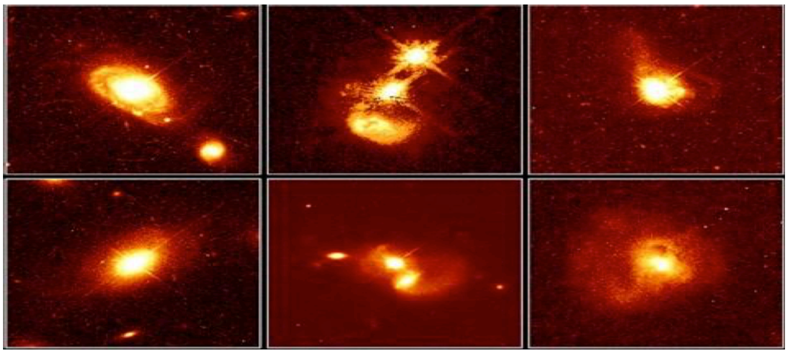

Figura 8.16 – Regiões hospedeiras de quasares.

Ainda não se sabe também qual é o mecanismo que alimenta essa produção fenomenal de energia. Parece ser consenso que a transformação de energia gravitacional em energia luminosa é o mecanismo alimentador, mas isso pode ocorrer de diversas maneiras. Hipóteses como contração do gás que sobrou após o processo de formação da galáxia, estrelas supermassivas girando a enormes velocidades e possuindo um campo magnético intenso (conhecidas como spinars) ou mesmo buracos negros gigantescos no núcleo de uma galáxia vêm sendo levantadas por astrônomos nas últimas décadas. A hipótese do buraco negro central é a mais aceita atualmente e justificaria, ao mesmo tempo, o tamanho compacto da fonte e sua intensa produção de energia, uma vez que um buraco negro com um bilhão de vezes a massa do Sol é capaz de gerar, durante a sua vida, uma energia equivalente a 100 milhões de vezes essa mesma massa. Ela pode inclusive explicar o porque de um quasar ser uma fonte de ondas de rádio, utilizando a hipótese de que o gás sugado para dentro do buraco negro pode, devido ao movimento espiralado semelhante ao da água correndo para dentro de um ralo de pia, atuar como um dínamo e produzir feixes de partículas que seriam ejetados em direções opostas. Esses feixes ativariam as regiões extensas mencionadas no começo dessa seção. A Tabela 8.1 contém uma lista de diversos objetos que, embora sejam também galáxias, foram classificadas separadamente em função de algumas características peculiares, mencionadas na segunda coluna da tabela. A Figura 8.17 mostra uma imagem do quasar 3C 219 no óptico e em rádio.

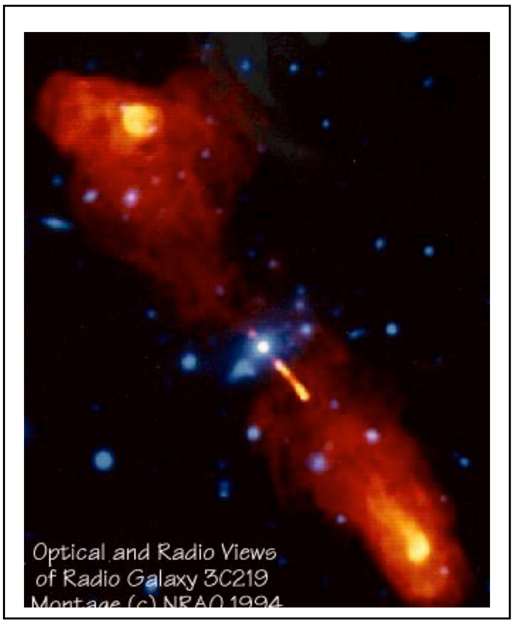

Figura 8.17 – Imagens superpostas do quasar 3C 219. No centro encontramos a componente óptica, observado no óptico. Observe o jato fraco de matéria saindo da fonte (parte central da imagem). À mesma fonte medida em rádio mostra o forte jato, com o formato aproximado de um taco de beisebol na parte inferior direita da figura.

TABELA 8. 1 – Diversos tipos de galáxias ativas e suas características principais

GALÁXIAS ATIVAS	
Seyferts	Galáxias espirais com núcleo brilhante. Observação do núcleo mostra linhas de emissão e emissão em rádio
Galáxias N	Galáxias elípticas com núcleo brilhante. Algumas são radiofontes.
Objetos BL Lacertae	Provavelmente galáxias elípticas com núcleo muito brilhante. Observação do núcleo mostra uma emissão contínua sem nenhuma particularidade e polarização bastante variável.
QSOs	Objetos quase estelares semelhantes aos quasares, mas que não apresentam a emissão na faixa de rádio característica daqueles. Apresenta também desvios para o vermelho bastante grandes.

Segundo Fred Hoyle, um famoso astrônomo britânico, falecido em 2002, o entendimento de porquê existem diferentes tipos de galáxias e como elas se formaram é um dos problemas mais importantes que existem hoje em astronomia. As propriedades das estrelas individuais que formam as galáxias é assunto abordado pela astrofísica e astronomia, enquanto o fenômeno da formação das galáxias toca a área da cosmologia. Pode-se dizer que o estudo das galáxias cria uma ponte entre a astronomia e astrofísica convencional de um lado e a cosmologia do outro.

8.6. A ESCALA DE DISTÂNCIA COSMOLÓGICA

Todo o estudo da astronomia depende, fundamentalmente, de se conhecer a que distância se encontra o objeto estudado para, a partir daí, se determinar o seu brilho intrínseco e estudar as propriedades da radiação que chega até nós. Historicamente, os modelos cosmológicos concebidos pelo Homem envolviam a Terra, a Lua, o Sol, os planetas e as estrelas distantes e, desde o tempo da civilização grega tem-se feito determinações do tamanho da Terra e das distâncias Terra-Sol e Terra-Lua. O aparecimento dos telescópios, no séc. XVII, só veio aumentar a necessidade de se "mapear a estrada cósmica", começando com a nossa vizinhança mais próxima.

A ideia, acredita-se que inicialmente formulada por Emanuel Kant, que nebulosas elípticas eram na verdade aglomerados enormes de estrelas, trouxe ao Homem a necessidade de entender melhor os diferentes objetos que ele avistava no céu. A descoberta dos aglomerados de galáxias e da expansão do Universo, no séc. XX, acentuou esse problema. Os astrônomos resolveram, então, sistematizar as maneiras de determinar as distâncias até esses objetos, para poder realizar o "mapeamento cósmico". Nessa seção vamos estabelecer as bases para a discussão, feita no capítulo sobre Cosmologia, que diz que quanto maior a distância que um objeto se encontra de nós, maior a velocidade com que ele se afasta. A pergunta que vamos responder nessa seção é como os astrônomos medem as distâncias aos objetos extragalácticos.

Conforme comentado nos capítulos anteriores, medidas de paralaxe são utilizadas para estimar as distâncias a estrelas próximas. Entretanto, os erros nessas medidas limitam o uso das paralaxes a distâncias inferiores a cerca de 100 anos-luz. Estrelas Cefeidas e estrelas Novas podem ser usadas para medir distâncias na nossa Galáxia e até galáxias

próximas. Eles possuem características bastante marcantes (tais como a intensidade do brilho ou a variabilidade regular) que permitem sua identificação em outra galáxia. A comparação é feita entre objetos do mesmo tipo, cuja paralaxe de um deles tenha sido determinada. Como a intensidade da luz emitida decai com o inverso do quadrado da distância entre fonte e o observador, é possível estimar a distância até objetos mais distantes.

Os métodos utilizando Cefeidas permitem medidas razoavelmente seguras de distâncias até cerca de 10 milhões de anos luz; a partir daí torna-se mais e mais difícil identificar Cefeidas individuais nas galáxias. Para atingir distâncias maiores é necessário utilizar outros calibradores padrão, cujo brilho e/ou tamanho angular intrínsecos conhecidos podem ser comparados ao brilho e tamanho de objetos semelhantes, mas localizados a distâncias maiores. Naturalmente, o truque nesse processo é ter certeza que escolhemos um critério adequado para reconhecer que observamos o mesmo tipo de objeto visto na nossa vizinhança.

Com o "mapeamento da estrada cósmica" até algumas centenas de milhões de anos-luz da Terra, uma nova questão aparece claramente aos astrônomos: por que existem algumas escalas de aglutinação preferenciais no Universo? Em outras palavras, por que o Universo segue uma hierarquia de distribuição de matéria, mas somente até um certo ponto?

8.6.1. HIERARQUIAS

Se tirarmos uma "radiografia" do Universo, veremos que sua estrutura é hierárquica. Além das galáxias em pares, observamos grupos (constituído de algumas poucos a algumas dezenas de objetos, num raio de cerca de 1 milhão de anos-luz – essa é a hierarquia mais comum, com a maior parte das galáxias sendo encontradas em grupos), aglomerados (alguns milhares de objetos, num raio de cerca de 10 milhões de anos luz) e superaglomerados (contém cerca de 100 a 1000 aglomerados num raio de aproximadamente 100 milhões de anos-luz). Encontramos uma espécie de parede de galáxias a uma distância de aproximadamente 450 milhões de anos-luz e, a partir daí, não existe

nenhuma evidência de outro nível na hierarquia de aglutinação da matéria (Figura 8.18). Aparentemente, ao tentar enxergar o Universo além de 450 milhões de anos-luz não encontramos nenhuma estrutura porque estamos olhando para uma região/época em que as galáxias ainda não haviam se formado. Conforme mencionamos antes, olhar para os confins do Universo é a mesma coisa que observar regiões num passado remoto, perto da época em que o próprio Universo se formou.

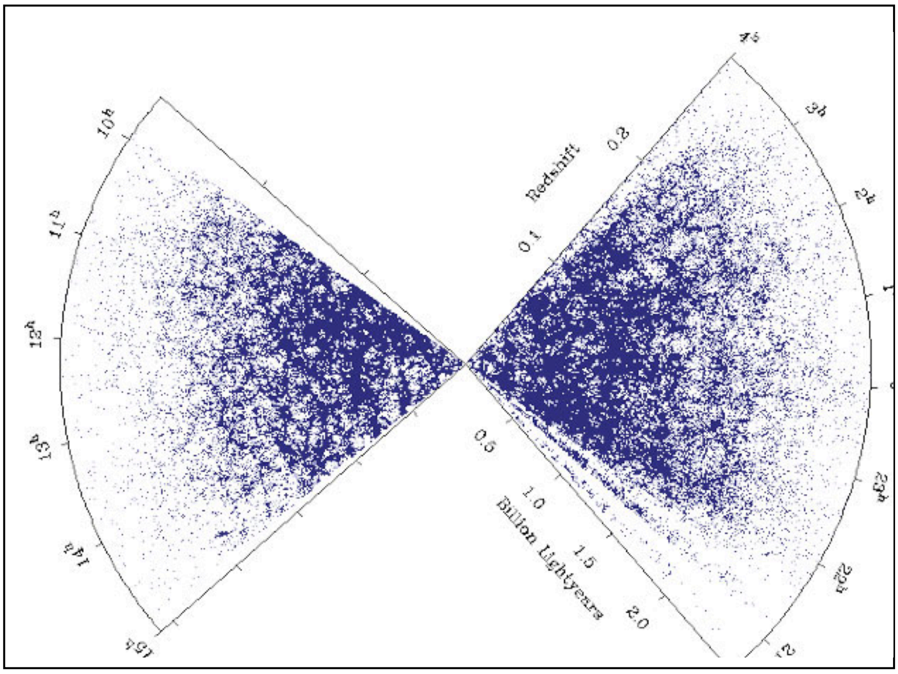

Figura 8.18 – A distribuição de galáxias no Universo próximo feita pelo 2dF Survey (http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS).

O aglomerado mais próximo de nós é o aglomerado de Virgem, localizado a cerca de 50 milhões de anos-luz (na direção da constelação de Virgem). Ele contém cerca de 200 galáxias brilhantes, das quais 68% são espirais, 19% são elípticas e o resto é constituído de galáxias irregulares ou não classificadas (já visto nas Figuras 8.6, 8.7 e 8.9). Localizado a cerca de 350 milhões de anos-luz, o aglomerado de Coma é o segundo mais próximo e contém alguns milhares de galáxias de todos os tipos já comentados. Ao contrário de Virgem, em Coma a maioria das galáxias são elípticas ou S0 (cerca de 80%) e somente uns 15% são classificadas como espirais ou irregulares. Duas características são notáveis nos aglomerados ricos como Coma: a) a relativa ausência de galáxias espirais e b) a existência de uma ou duas supergigantes elípticas próximo ao centro do aglomerado.

8.6.2. DISTÂNCIAS TÍPICAS

Estamos acostumados, no nosso dia a dia, a pensar e trabalhar com distâncias e medidas em termos das nossas próprias dimensões; quando precisamos pensar em coisas muito grandes e muito pequenas, dimensões menores que décimos ou centésimos de milímetros, ou milhares de quilômetros já são difíceis de quantificar mentalmente. Se pensarmos, então, nas distâncias típicas que envolvem os fenômenos astronômicos, veremos que elas encontram-se, muitas vezes, além da nossa realidade e mesmo da imaginação. Vamos montar uma tabela que nos mostra, em termos gerais, as relações de tamanho entre objetos no Universo que conhecemos:

TABELA 8.2 – Escala do Universo conhecido (Adaptada de Ferris, pág. 225)

RAIO (METROS)	OBJETOS CARACTERÍSTICOS
10^{26}	Universo observável
10^{24}	Superaglomerados de galáxias
10^{23}	Aglomerados de galáxias
10^{22}	Grupos de galáxias
10^{21}	Nossa Galáxia (Via Láctea)
10^{18}	Nebulosas gigantes
10^{12}	Sistema Solar
10^{11}	Atmosfera exterior das estrelas gigantes
10^{9}	Sol
10^{8}	Planetas gigantes (Júpiter, p. ex.)
10^{7}	Estrelas anãs, planetas como a Terra
10^{5}	Asteróides, núcleos de cometas
10^{4}	Estrelas de nêutrons
1	Seres humanos
10^{-2}	Molécula de DNA (eixo longo)
10^{-5}	Células vivas
10^{-9}	Molécula de DNA (eixo curto)
10^{-10}	Átomos
10^{-14}	Núcleos dos átomos pesados
10^{-15}	Prótons e nêutrons
10^{-35}	Escala de Planck; quantum de espaço

É interessante frisar que, em Astrofísica Extragaláctica e Cosmologia, trabalhamos com as maiores distâncias que um ser humano pode imaginar; algo entre 22 e 26 ordens de grandeza maior que suas próprias dimensões! Não é de se admirar que, ao extrapolar as

distâncias para valores cada vez maiores, as incertezas envolvidas sejam também grandes. Tipicamente, a incerteza sobre o tamanho do Universo e, indiretamente, sobre sua idade, vem dos problemas em se calibrar e extrapolar a distância até os objetos mais distantes. A Lei de Hubble, que descreve a velocidade de recessão das galáxias, pode ser usada para estimar as dimensões típicas do nosso Universo e será discutida em detalhes no capítulo sobre Cosmologia.

8.7. REFERÊNCIAS

Além da bibliografia em português e inglês consultada, incluo alguns outros textos que talvez despertem a atenção daqueles que tiveram uma formação em ciências exatas. Eles foram escolhidos com base pura e simplesmente no meu gosto pessoal

1. “O despertar da Via Láctea”. Thimothy Ferris. Ed. Campus, 1990. Texto de divulgação, um pouco romanceado, mas que cobre de forma bastante fiel a história da astronomia, desde seus primórdios. O autor é um dos grandes jornalistas ligados à divulgação científica nos EUA.
2. “A Brief History of Time”. Stephen Hawking. Um dos livros mais divulgados sobre Cosmologia, lamentavelmente muito mal traduzido para o português, sob o título “Uma breve história do tempo”. Ainda assim, um texto muito interessante, por mostrar a visão de Universo de um dos grandes físicos da segunda metade do século XX.
3. “Shadows of Creation: Dark Matter and the Structure of the Universe”. Michael Riordan e David Schramm. W. H. Freeman and Co., New York, 1991. Texto de divulgação científica, escrito com o objetivo de passar ao leitor os conceitos básicos do processo de formação de estruturas e da existência de matéria escura no Universo.
4. “The Physical Universe”. Frank Shu. University Science Books, 1982. Livro texto adotado em diversas universidades americanas, em geral usado para apresentar um curso de um ano em astronomia para alunos que não vão seguir a carreira científica.

5. Revistas “Scientific American Brasil” e “Ciência Hoje”. Existem diversos artigos ligados à formação do Universo e à interação entre galáxias. Vale a pena pesquisar.

6. “Foundations of Astronomy”. Michael Seeds. Wadsworth Publising Co., 1997. Livro texto de introdução à astronomia, com textos claros e excelentes ilustrações. Um dos pontos altos do livro são as caixas de texto com questionamentos e as perguntas no final de cada capítulo.

Capítulo 9

Cosmologia

Carlos Alexandre Wuensche

Revisado em 2017

LISTA DE FIGURAS **4**

9.1. INTRODUÇÃO **6**

9.1.1 UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA 6

9.1.2 O QUE É COSMOLOGIA? 8

9.2 O UNIVERSO OBSERVÁVEL **10**

9.2.1 UMA VISÃO GERAL 11

9.2.2 LEI DE HUBBLE (OU A VELOCIDADE DE RECESSÃO DAS GALÁXIAS) 14

9.2.3 TESTES CINEMÁTICOS: RELAÇÕES LUMINOSIDADE X REDSHIFT E DISTÂNCIA ANGULAR X REDSHIFT 15

9.2.4 CONTAGEM DE GALÁXIAS 16

9.2.5 O ARCABOUÇO TÉORICO DE FRIEDMANN, LEMAITRE, ROBERTSON E WALKER 17

9.3 O UNIVERSO PRIMORDIAL **19**

9.3.1 COMPOSIÇÃO 19

9.3.2 UMA BREVE HISTÓRIA TÉRMICA 20

9.3.3 INFLAÇÃO 22

9.3.4 NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL 24

9.3.5 A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS 25

9.4 O UNIVERSO NÃO-HOMOGÊNEO **30**

9.4.1 COLAPSO GRAVITACIONAL 31

9.4.2 FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS 33

9.5 O SETOR ESCURO 40

9.5.1 MATÉRIA ESCURA 40

9.5.2 ENERGIA ESCURA 42

9.6 O UNIVERSO HOJE 44

9.6.1 A GEOMETRIA E EVOLUÇÃO DO UNIVERSO 46

9.6.2 O FUTURO DO UNIVERSO 48

9.7 CONCLUSÃO 49

9.8 REFERÊNCIAS 52

LISTA DE FIGURAS

Figura 9.1 – Espectro da radiação eletromagnética, de raios gama até ondas longas de rádio. A parte superior mostra a opacidade da atmosfera em função do comprimento de onda. A pequena banda colorida é a faixa óptica do espectro e, à esquerda estão localizadas as faixas do ultravioleta, raios-X e raios gama. Na parte inferior da figura, as regiões que absorvem radiação estão marcadas em marrom, com desenhos de satélites para observações fora da atmosfera e as duas bandas (óptico e rádio) observadas da superfície da Terra com telescópios. (Fonte: https://physics.stackexchange.com/questions/135260)..........................9

Figura 9.5 –À esquerda, o acoplamento causada pelo espalhamento Thomson obriga os fótons a percorrerem um caminho aleatório. Após a recombinação (à direita), os fótons podem ser propagar livremente pelo Universo. Fonte: http://universeadventure.org. 21

Figura 9.6 – Diagrama descritivo da história do Universo. Os números na parte inferior descrevem, respectivamente, o tempo (época) e a energia (temperatura) correspondentes a cada evento. Cada linha magenta representa um grande evento na história cósmica. Da esquerda para a direita: época da Grande Unificação (10^{-44} s); inflação (10^{-32} s); desacoplamento das forças eletrofraca e forte (10^{-10} s); nucleossíntese primordial (entre 10^{-2} s e 180 s); desacoplamento matéria-radiação (3 x 10^{5} anos); formação de estruturas (1 x 10^{9} anos); época atual (12 x 10^{9} anos). Fonte: Particle Data Group, LBNL (2008)...22

Figura 9.7 – Abundância relativa dos elementos leves em relação ao Hidrogênio. A linha vermelha central define os valores para cada um dos elementos, estimado a partir de medidas do satélite WMAP, considerando que a descrição do Universo concorda com o MCP (Fonte: https://map.gsfc.nasa.gov/). 25

Figura 9.8 – Espectro de corpo negro teórico com T = 2,726 K, superposto a medidas feitas por diferentes instrumentos no solo, a bordo de balão, a bordo de foguete e a bordo do satélite COBE. O pico encontra-se próximo da freqüência de 200 GHz. A escala de intensidade no eixo Y é de intensidade por ângulo sólido por frequência. Fonte: https://inspirehep.net/record/1295471/plots. 27

Figura 9.9 – Comparação entre os mapas das flutuações de temperatura feitos pelos três satélites dedicados a medir a RCFM. As manchas azuis (mais frias) e vermelhas (mais quentes) correspondem às flutuações de temperatura no Universo jovem. Deve-se notar o aumento de qualidade dos mapas, correspondentes à melhor resolução dos detectores. Fonte: http://slideplayer.com/slide/10583101. 28

Figura 9.10 – Espectro de potência angular das flutuações de temperatura da RCFM. Em destaque encontram-se os picos acústicos, causados por diferentes processos físicos antes e durante o período da recombinação. Fonte: Autoria própria. 29

Figura 9.18 – Distribuição das galáxias com z ≤ 1 (~2 milhões de anos luz), no Hemisfério Sul, medidas pelo 6dF Galaxy Redshift Survey. O mapa contém 136.304 galáxias e mostra, claramente, a distribuição de estruturas no Universo próximo e uma rarefação à medida que o *redshift* aumenta, na direção das bordas da esfera. Fonte: http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/...39

Figura 9.19 – Foto do levantamento de galáxias 2MASS (2 Micron All Sky Survey) contendo cerca de 1,6 milhões de galáxias em todo o céu. As galáxias mais brilhantes e mais próximas são representadas em azul, e as mais fracas, as mais distantes estão em vermelho. A faixa escura nesta imagem mostra a área do céu onde a nossa Via Láctea galáctica bloqueia a nossa visão de objetos distantes, que, nesta projeção, situa-se predominantemente ao longo das bordas da imagem. (Fonte: IPAC/Caltech). 39

Figura 9.20 – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia, uma espiral. A curva azul é a combinação das curvas de disco, gás e halo e esperava-se que ela decrescesse para raios maiores que 20 ou 30 kpc, conforme a curva vermelha, de acordo com as leis de Newton (Fonte: http://astro.if.ufrgs.br). 41

Figura 9.21 – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia espiral. Acredita-se que a diferença entre as curvas é causada pela presença de matéria escura (Fonte: http://astro.if.ufrgs.br)....................................42

Figura 9.22 – Diagrama de fluxo (m-M) x distância para supernovas tipo I observadas pelos grupos de Perlmutter e Riess. O painel inferior mostra a diferença entre os dados e as previsões de modelo com Λ=0 e Ω_M= 0,3. Fonte: http://www.cfa.harvard.edu/oir/Research/supernova/HighZ.html.........................44

Figura 9.23– Distribuição percentual dos componentes de matéria e energia no Universo.......................45

Figura 9.24 – Comparação das diferentes geometrias no Universo (aberta, plana e fechada) e seu efeito na distribuição angular de temperaturas da RCFM. 47

9.1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas temos percebido um aumento rápido no conhecimento sobre a nossa vizinhança cósmica e, com as observações de objetos cada vez mais distantes, a fronteira do Universo parece ter sido empurrada para os confins do tempo. Somos a primeira geração de seres humanos capazes de perceber os grandes detalhes da História Cósmica, das origens do Universo até o desfile das estrelas pelos céus, da formação de sistemas planetários próximos ao nosso próprio sistema solar à descoberta que moléculas essenciais para a formação da vida encontram-se espalhadas por toda a nossa Galáxia e outras galáxias.

Nossa percepção de mundo e, quiçá, do futuro da humanidade sobre a Terra, será fortemente influenciado pela apreciação e entendimento dos processos físicos que ocorrem no Universo. Nesse capítulo faremos um breve resumo da História da Cosmologia e apresentaremos uma visão da Cosmologia dentro do paradigma observacional que permite formular um modelo mais consistente de Universo: o chamado **Modelo Cosmológico Padrão (MCP), ou Ω-CDM**. Discutiremos os constituintes do Universo, os principais pontos relacionados com sua origens e evolução. Finalizaremos este capítulo com uma breve discussão sobre o futuro do Universo.

9.1.1 UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA

As origens históricas de uma visão cosmológica do Universo estão diretamente ligadas aos conceitos míticos que povoaram as religiões dos povos antigos. Como as fronteiras do "mundo conhecido" eram praticamente desconhecidas, cada civilização associava seu "universo" ao mundo terreno, Sol, Lua e planetas. Essa associação tinha raízes numa necessidade de organizar o "Cosmos" e, de alguma forma, explicar a origem do lugar onde o Ser humano vivia.

Durante boa parte do curso da História, a associação de corpos errantes no céu com divindades nos remete diretamente ao conceito de magia, que hoje pode ser vista como uma tentativa de manipular a influência do Ser humano no mundo natural. Nessa época vivíamos num mundo de relacionamentos e afinidades, cujo pretenso controle era feito por sacerdotes e magos, com o objetivo de tentar compreender e dominar as forças da natureza.

Nesse sentido, enquanto "experimentador de técnicas mágicas", o sacerdote pode ser considerado como o antepassado do cientista e, por que não?, do astrônomo, uma vez que muitas das crenças mágicas envolviam rituais em que a necessidade de se prever ou aproveitar os ciclos celestes era premente. As crenças humanas a respeito do Cosmos e o desenvolvimento de suas ideias sobre a natureza serviram como um fio que guiou a

espécie humana através do labirinto de diferenças culturais em várias civilizações e ao longo do tempo. Essas crenças agiram também como um espelho, refletindo a visão científica de sua época.

A cosmologia na Idade Antiga pode ser bem representada pela astronomia egípcia e mesopotâmica e seu apogeu ocorreu no florescer da Grécia Clássica. A civilização grega clássica (600 a.C.) foi a sociedade antiga que mais avançou em Astronomia e em outras áreas do conhecimento humano como filosofia, matemática e artes. Ao mesmo tempo, a mitologia grega era bem criativa. Essa civilização foi bastante influenciada pelos antigos egípcios e babilônios, tanto na área mitológica como na científica. A cosmologia grega, por exemplo, foi uma fusão evoluída das idéias egípcias, fenícias, mesopotâmias, minoanas e micênicas. Muitos filósofos, pensadores e cientistas gregos contribuíram para o crescimento da astronomia.

A civilização árabe deu continuidade à busca do conhecimento científico e à evolução cultural proporcionados pelos antigos gregos. Foram os árabes que nomearam boa parte das estrelas e constelações com o nome que conhecemos hoje. Por outro lado, durante a Idade Média (de 800 a 1450 d.C.), a evolução do pensamento científico na civilização ocidental foi praticamente inexistente. O modelo de Ptolomeu (Universo Geocêntrico) transformou-se em dogma adotado pela religião cristã e, em conseqüência, pela civilização cristã. Era conveniente e alinhado com o pensamento eclesiástico da época admitir a Terra como centro do Universo. No séc. XV, o filósofo e astrônomo germânico Nicolau de Cusa (1401 – 1464) sugeriu, em seus trabalhos, imaginou que a Terra não era o centro do Universo propondo que a mesma girava em torno de seu eixo e imaginou que as estrelas fossem outros sóis situados a distâncias diferentes num espaço infinito.

Entretanto, somente com o Renascimento Europeu, associado ao período das grandes viagens de navegação, a Ciência Ocidental retomou seu crescimento. O início da revolução astronômica veio com a introdução do sistema heliocêntrico para o Universo, proposto por Nicolau Copérnico (1473 – 1543) e a visão de Universo de Giordano Bruno (1548 – 1600), seguido pela utilização do telescópio por Galileu Galileu (1564 – 1642) e pela descoberta das leis que levam o nome do astrônomo Johannes Kepler (1571 – 1630), entre os sécs. XV e XVII. A partir desses três marcos e das descobertas científicas de Isaac Newton (1643 – 1727), no séc. XVIII, a Astronomia começou a evoluir de forma quantitativa, separando-se cada vez mais da astrologia e marcando o início da chamada ciência moderna. A noção real de que um “universo” existe além do nosso sistema solar só veio aparecer no séc. XIX e a cosmologia, enquanto ciência individual, somente passou a ser considerada no séc. XX. Partiremos dessa época para nossa abordagem cosmológica.

9.1.2 O QUE É COSMOLOGIA?

A Cosmologia é a ciência que estuda a origem, estrutura e evolução do Universo e é uma ciência multidisciplinar. Seu objetivo é entender como o Universo se formou, por que ele tem a forma que hoje vemos e qual será o seu destino no futuro. As principais ferramentas utilizadas para esse entendimento vêm da Física, Matemática e Astronomia. Da Física vem as leis que descrevem fenômenos físicos nos laboratórios da Terra e, ao verificarmos que elas descrevem fenômenos semelhantes em lugares distantes do Universo, podemos reafirmar seu caráter universal. De certa maneira, um cosmólogo utiliza o Universo como um imenso laboratório. A Matemática nos dá a linguagem utilizada para registrar os processos observados e que permitem uma descrição precisa dos fenômenos astronômicos. Da Astronomia tomamos emprestadas as técnicas de observação do céu, medição do tempo e determinação das escalas de distância envolvidas. Observações astronômicas de objetos e fenômenos distantes são utilizadas pelos cosmólogos na montagem do quebra-cabeças que é entender o Universo. Podemos ainda incluir, no rol das ferramentas, a Química e a Filosofia. A primeira é importante no estudo da composição da matéria no meio interestelar e a segunda fornece o arcabouço que insere a Cosmologia na hierarquia do pensamento humano.

O estudo da cosmologia está intimamente ligado a uma teoria de gravitação, uma vez que a força que atua em escalas astronômicas e cosmológicas é a força gravitacional, uma das quatro forças conhecidas (além da gravitacional, as forças eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca). A principal teoria de gravitação utilizada na descrição do Universo em escalas muito grandes – maiores do que os aglomerados e super-aglomerados de galáxias – é a **Teoria da Relatividade Geral** (TRG), proposta por Albert Einstein (1879 – 1955). Ela veio substituir a **Teoria Clássica da Gravitação** proposta por Isaac Newton e, em linhas gerais, descreve como a matéria molda o espaço-tempo em que está inserida, ao mesmo tempo em que o espaço-tempo define as propriedades de dinâmicas (isto é, de movimento) da matéria. Ela será brevemente descrita na Seção 9.3.1. Algumas variantes da TRG existentes hoje serão também rapidamente abordadas.

Ao observar o céu, o ser humano pode "definir" o tamanho do seu Universo (no jargão astronômico, o "Universo observável", muito menor do que o Universo inteiro) em função das limitações dos instrumentos disponíveis e, consequentemente, da região acessível a seus instrumentos. Isso não quer dizer que não existam fenômenos além das regiões que conseguimos ver. Nosso universo tem as fronteiras tecnológicas (que vão sendo superadas à medida que inventamos instrumentos mais sensíveis) e as impostas pelas leis físicas. Nesse caso estamos limitados pela velocidade com que a informação transportada pela radiação eletromagnética (que pode ser luz, ondas de rádio, raios X e radiação medida em outros comprimentos de onda) se propaga. Assim, é possível

estender o raciocínio e imaginar que existem fenômenos astronômicos que já aconteceram, mas cujo sinal eletromagnético (na forma de ondas de rádio, por exemplo) ainda não chegou até nós porque a fonte encontra-se muito distante da Terra.

Além da questão da distância existe o problema da absorção da radiação eletromagnética incidente, em quase todo o espectro eletromagnético, pela atmosfera da Terra. As únicas "janelas" visíveis do solo estão nas faixas óptica e rádio do espectro. A Figura 9.1 apresenta um diagrama que relaciona os comprimentos de onda com o mecanismo de absorção dentro da atmosfera. Estudando a radiação eletromagnética emitida por objetos celestes, podemos estimar a que distância eles se encontram, mapear o Universo e, em última instância, procurar respostas para algumas perguntas fundamentais formuladas pelo ser humano desde que este começou a olhar para o céu... Em última instância, sempre estaremos questionando nossas origens: quem somos? De onde viemos? Para onde vamos?

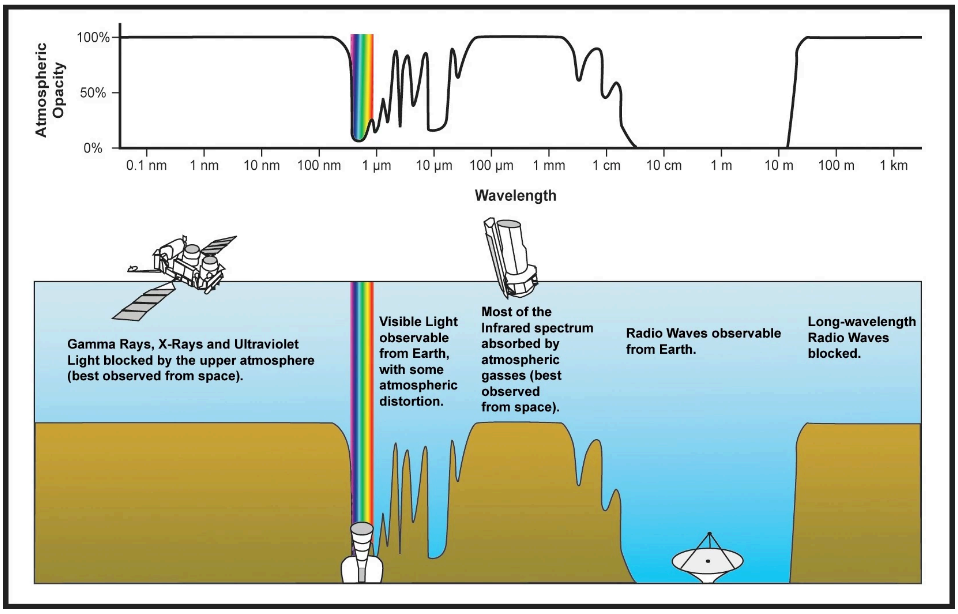

Figura 9.1 – Espectro da radiação eletromagnética, de raios gama até ondas longas de rádio. A parte superior mostra a opacidade da atmosfera em função do comprimento de onda. A pequena banda colorida é a faixa óptica do espectro e, à esquerda estão localizadas as faixas do ultravioleta, raios-X e raios gama. Na parte inferior da figura, as regiões que absorvem radiação estão marcadas em marrom, com desenhos de satélites para observações fora da atmosfera e as duas bandas (óptico e rádio) observadas da superfície da Terra com telescópios. (Fonte: https://physics.stackexchange.com/questions/135260)

Contudo, a motivação recente para o estudo da Cosmologia vem de questões em aberto na física e na astronomia, tais como:

- Como o Universo foi criado? Como ele terminará?
- Como as estruturas de matéria em grande escala se formaram?

- Qual o tamanho e a geometria do Universo?
- Qual é a composição química do Universo?
- O que são a matéria e a energia escura?
- Como descrever os fenômenos do Universo primordial através do modelo padrão da Física de Partículas?
- Porque o Universo está acelerando?
- Qual será o destino do Universo?

A pesquisa fundamental em Cosmologia envolve técnicas e instrumentação extremamente sofisticadas, muitas vezes desenvolvidas especificamente para este tipo de pesquisa. Parte da motivação para se desenvolver os supercomputadores vem da necessidade de se usar processadores mais e mais poderosos para simular a formação e evolução das primeiras galáxias.

Além disso, certas condições físicas no Cosmos são tão extremas que jamais poderão ser conseguidas na Terra, de modo que a Cosmologia associa-se à Física para utilizar o Universo como um grande laboratório. Nas palavras de Yacob B. Zel'dovich (1914 – 1987) "O Universo é o acelerador de partículas dos pobres". Nos primeiros momentos do Universo, em que as energias são extremamente altas, a melhor descrição física é obtida com os conceitos da Física de Partículas. Fenômenos como o desacoplamento das forças eletrofraca e nuclear forte da força gravitacional, um possível momento em que houve a **Grande Unificação**, com as quatro forças sendo descritas por uma única teoria e a própria nucleossíntese primordial, quando foram formados os primeiros átomos de Deutério e Hélio, logo após os quarks livres serem confinados nos hádrons que constituem prótons e nêutrons, estão no âmbito da Física de Partículas, e o Universo pode, de fato, ser considerado como o "grande acelerador de partículas".

Finalmente, o apelo intelectual e o conhecimento das perspectivas sobre o Universo em que vivemos podem servir até como fator de orientação ética, direcionando as ideias do ser humano e fornecendo parâmetros para nortear escolhas que podem definir o futuro da nossa espécie. Sob esse aspecto, a Física, a Astronomia e a Cosmologia não geram conhecimento supérfluo e irrelevante – sua importância é vital.

9.2 O UNIVERSO OBSERVÁVEL

O objetivo final da Cosmologia é explicar o Universo em termos de uma teoria simples e esteticamente atraente. Entretanto, de todas as ciências, a Cosmologia é a mais exigente em termos de extrapolação de resultados e conceitos, já que as escalas de tempo e distância envolvidas nos problemas cosmológicos são da mesma ordem de

grandeza da idade e tamanho do Universo que queremos observar. Além disso, ao contrário de um experimento em laboratório, não podemos criar (ou não existem) vários universos para que possamos fazer uma análise estatística completa de suas propriedades. Nessa seção serão discutidos alguns dos testes e observáveis usados para mapear a escala de distância cósmica

Ao estudarmos a distribuição de matéria no Universo, da forma apresentada neste curso, por exemplo, partimos dos menores constituintes para o "todo". É fácil perceber que existe uma hierarquia no Universo, em que matéria vai se juntando para formar uma determinada estrutura que, numa escala maior, comporta-se como uma pequena parte que será juntada às outras para formar uma estrutura ainda maior e assim sucessivamente, até um limite em que o Universo torna-se homogêneo, isto é, sem estruturas aparentes.

A teoria mais aceita no momento é que o Universo foi criado a partir de um estado inicial muito denso e quente, com fótons com energias inimagináveis e pares de partículas sendo criados e aniquilados a cada instante. Deixamos para a reflexão do leitor a questão de como o Universo "se organizou", aparentemente violando a Segunda Lei da Termodinâmica?

9.2.1 UMA VISÃO GERAL

Nossa descrição do Universo primordial baseia-se mais nos cálculos e no conhecimento que temos sobre as leis da Física. As escalas de distância cobertas pelos telescópios ópticos e radiotelescópios vão até cerca de 13 bilhões de anos luz, ou praticamente a borda do Universo, já que estimamos que ele tenha cerca de 13,9 bilhões de anos. A última medida direta de um observável astronômico é a Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (doravante RCFM), com praticamente 13,9 bilhões de anos, e situada em z ~ 1100. Os outros observáveis, tais como neutrinos primordiais e os primeiros núcleos de elementos (H, He, D, Li) somente podem ser estimados de forma indireta.

Temos um bom conhecimento sobre o Universo mais jovem, entre cerca de 10^{-6} s e ~ 380 mil anos de idade. Esse período é explorado a partir das informações que extraímos do estudo da RCFM, descoberta por Arno Penzias (1933 –) e Robert Wilson (1936 –) em 1964, e da sua associação com o estado primordial denso e quente mencionado anteriormente.

As galáxias mais próximas são brilhantes e permitem um estudo mais detalhado de suas propriedades. À medida que observamos objetos mais e mais distantes, a quantidade de radiação que recebemos é cada vez menor e, por essa razão, astrônomos sempre estão desenvolvendo instrumentos mais sofisticados. Olhando "mais fundo" no Universo, os astrônomos tentam conhecer mais detalhes sobre a época de nascimento das galáxias,

sua distribuição no espaço e sua evolução. Essa distribuição é conhecida como **Estrutura em Grande Escala (Figura 9.2)**.

O *redshift* (do inglês, deslocamento para o vermelho) é uma propriedade observada nas linhas espectrais das galáxias, que são deslocadas para maiores comprimentos de onda, na direção da parte vermelha do espectro eletromagnético (região de menor energia). A variação da freqüência em função do movimento do corpo emissor é conhecida como efeito Doppler a a variação é tanto maior quanto mais distante estiver a galáxia observada. O mapa apresentado na **Figura 9.2** é baseado nas medidas de *redshift* das galáxias e aglomerados.

Figura 9.2 – Levantamento de galáxias 2MASS, distribuídas em função do *redshift*, com cerca de 1,6 milhões de galáxias. A faixa brilhante no centro é a Via Láctea, onde estamos localizados. feito pela equipe do Center for Astrophysics (CfA) nas décadas de 70 e 80. O centro da figura representa o observador, ou seja, nós. Os números entre parênteses representam a distância em unidades de megaparsecs[1] ou, quando somente um número, o *redshift.* Os pontos mais distantes estão representados em vermelho e estão um *redshift* ~ 1,0. Muitas galáxias estão ligadas pela atração gravitacional, formando aglomerados que, por sua vez, se agrupam em super aglomerados e em estruturas ainda maiores. Fonte: IPAC/Caltech (https://apod.nasa.gov/apod/image/0712/lss_2mass_big.jpg).

Não sabemos exatamente em que época começou o processo de formação dessas estruturas, porque temos muito pouca informação sobre esse período do Universo, mas sabemos que isso deve ter acontecido quando o Universo tinha entre 100 milhões e 200

[1] 1 parsec (pc) = 3,26 anos luz = 3,09 x 10^{13} km, logo 1 Megaparsec (Mpc) = 10^{6} pc = 3,09 x 10^{19} km.

milhões de anos de idade, conforme dados obtidos pelos satélites Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) e Planck, lançados, respectivamente, em 2001 e 2009.

A partir do início da década de 90, a combinação dos resultados de medidas da RCFM com observações da distribuição de galáxias e aglomerados de galáxias, descritos com o arcabouço da TRG, possibilitaram a criação de um paradigma de modelo cosmológico, conhecido como **Modelo Cosmológico Padrão** (doravante MCP). Ele é baseado na métrica de Robertson-Walker, nas equações de Friedmann e em observações que dão a sustentação para o MCP. Apesar de ainda deixar uma série de perguntas sem resposta, este modelo é o que melhor descreve o Universo que observamos e é baseado nos seguintes pontos:

- Não há região ou observador no espaço que ocupe uma posição preferencial em relação a outra qualquer. Essa afirmativa é conhecida como Princípio Cosmológico;
- O Universo é homogêneo e isotrópico em escalas suficientemente grandes;
- A existência e as propriedades da RCFM, a abundância de determinados elementos químicos leves (Hidrogênio, deutério, Hélio e Lítio), a observação da velocidade relativa de afastamento de galáxias distantes e a expansão acelerada do Universo são observações que sustentam o arcabouço teórico do MCP.

O item 1 foi enunciado por Nicolau Copérnico em fins do século XV e vem sendo utilizado na maioria dos modelos cosmológicos desde então. Como praticamente todos os processos observados na evolução das estrelas e galáxias podem ser descritos em termos da Física conhecida, acredita-se que as leis que descrevem os fenômenos físicos na nossa Galáxia são as mesmas em qualquer parte do Universo. Essa crença vem de podermos observar e descrever fenômenos que ocorrem em galáxias distantes com exatamente o mesmo formalismo matemático usado para descrever fenômenos locais.

O item 2 vem sendo estudado em detalhes nos últimos anos e verificado com base em resultados de diversos levantamentos de galáxias, ou "*redshift* surveys", como são conhecidos entre os profissionais. Podemos citar, como exemplo, o Center for Astrophysics/CfA Survey, o Sloan Digital Sky Survey/SDSS, o Six Degree Field Survey/62dF, e o Automated Plate Measuring/APM Survey, entre outros. Os "*redshift* surveys" atingem distâncias menores que 1 bilhão de parsecs, ou cerca de 3 bilhões de anos luz (correspondendo a um *redshift* z ~ 0.2). A homogeneidade e isotropia do Universo começam a ser verificadas a partir de distâncias da ordem de 600 milhões de anos luz (cerca de $6x10^{26}$ cm, que eqüivalem a ~ 200 milhões de parsecs ou ~ 6 bilhões de trilhões de quilômetros). Até distâncias dessa ordem ainda são observados diversos tipos de estrutura, tais como vazios, paredes e estruturas filamentares. Desse ponto até o ponto onde se formou a RCFM (~ 13 bilhões de anos luz, equivalentes a $1{,}23x10^{28}$ cm ou 120 bilhões de trilhões de quilômetros) existe uma lacuna de informações, mas

estimativas teóricas sugerem que esse foi o intervalo de tempo necessário para que a distribuição inicial de matéria evoluísse para formar as primeiras estruturas do Universo.

O item 3 apresenta as evidências observacionais que sustentam o MCP, sendo que a abundância dos elementos químicos nos traz informações sobre o processo da nucleossíntese primordial, a RCFM reflete o estado de equilíbrio termodinâmico no Universo jovem, a aceleração do Universo recentemente observada em medidas de supernovas tipo I e a velocidade de recessão das galáxias distantes são fortes evidências do processo de expansão do Universo. Eles serão descritos, separadamente**, nas seções 9.2.2, 9.3.4 e 9.3.5**.

9.2.2 LEI DE HUBBLE (OU A VELOCIDADE DE RECESSÃO DAS GALÁXIAS)

Em 1923, o astrônomo Edwin Hubble começou um estudo de estrelas Cefeidas em “nebulosas espirais”, incluindo a nossa vizinha Andrômeda (a galáxia M31), visível a olho nu. Usando a **relação período-luminosidade** para as Cefeidas, ele calculou a distância que elas se encontravam da Terra, obtendo um valor de 800.000 anos luz para Andrômeda e valores semelhantes para outros objetos. Os resultados mostraram que estes sistemas eram enormes conjuntos de estrelas e, definitivamente, encontravam-se fora da nossa Galáxia. Eles passaram a ser também chamados de galáxias e o conceito de “distância extragaláctica” estava criado.

Mas a mais importante descoberta de Hubble foi que as galáxias distantes se afastavam de nós e umas das outras. Seu resultado baseou-se na descoberta de uma relação linear entre a distância **D** das galáxias até nós (determinada pela relação período-luminosidade, por exemplo) e a velocidade **v**, determinada pela determinação do *redshift* das linhas espectrais observadas. Definimos o *redshift* **z** a partir do deslocamento causado pelo efeito Doppler medido nas linhas espectrais:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

em que λ é o comprimento de onda medido na estrela e λ_0 é o comprimento de onda da linha em repouso, ou seja, medido no laboratório. Utilizando a relação acima, escrevemos v=zc e podemos escrever:

$$cz = v = H_0.D.$$

A constante $\mathbf{H_0}$ é conhecida como constante de Hubble é 71±6 km/(s.Mpc). Esse valor tem dimensão $[t]^{-1}$, logo é possível, usando os valores medidos de **d** e **v**, fazer uma estimativa da idade do Universo. Essa estimativa fica como um exercício para o leitor.

Note que essa expressão só é linear para pequenos “*redshifts*” (tipicamente, z < 1). Essas observações mostraram uma afastamento sistemático e isotrópico, e foram confirmadas até distâncias de centenas de milhões de pc. A **Figura 9.3** apresenta um diagrama com as primeiras observações feitas por Hubble, publicadas em 1929, e a extrapolação usando medidas de objetos mais distantes, em 1931. Hubble foi forçado a fazer sua descoberta passo a passo, utilizando Cefeidas, variáveis RR Lyrae e estrelas supergigantes para ir calibrando as distâncias até o aglomerado de Virgem, e o resultado obtido aparece na **Figura 9.3 (esquerda).**

Qualquer observador no nosso Universo, situado numa galáxia distante, perceberá exatamente esse mesmo fenômeno. É como se o próprio espaço estivesse se expandindo e um observador em qualquer parte dele visse a mesma expansão, em qualquer direção que olhasse. Em homenagem a Edwin Hubble, a NASA colocou seu nome em um telescópio espacial que foi lançado em abril de 1990. Entre vários resultados espetaculares que o Telescópio Espacial Hubble obteve, nos interessa o “Hubble Cepheid Key Project”.

O gráfico à direita da **Figura 9.3** é baseado somente em dados coletados pelo Hubble, usando medidas de variáveis Cefeidas para determinar as distâncias. A inclinação da curva nos dá uma estimativa para a constante de Hubble de, aproximadamente, 70 km/s.Mpc. Com o Telescópio Hubble podemos, assim como Edwin Hubble, estudar Cefeidas, só que localizadas a distâncias trinta vezes maiores que as medidas feitas na década de 1920.

9.2.3 TESTES CINEMÁTICOS: RELAÇÕES LUMINOSIDADE X REDSHIFT E DISTÂNCIA ANGULAR X REDSHIFT

Objetos distantes podem ser estudados a partir da sua luminosidade aparente e, com instrumentos suficientemente sensíveis, é possível medir seu diâmetro angular. Tanto a luminosidade aparente quanto o diâmetro angular dependem dos parâmetros cosmológicos que descrevem o Universo em que vivemos e seus valores variam com o redshift em que o objeto se encontra. O diâmetro angular de uma fonte distante é dado por:

$$\Delta\theta = \frac{d}{D}(1 + z)$$

em que d é o comprimento físico do objeto, D é a distância cosmológica até ele, θ é o tamanho angular aparente e z é o redshift. O termo D/(1+z) é a chamada *distância de diâmetro angular*.

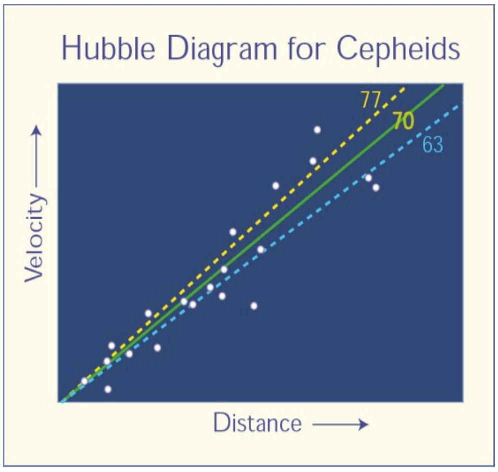

Figura 9.3 – Gráfico da Lei de Hubble inclui os dez maiores aglomerados de galáxias.(esquerda) O quadrado no canto inferior esquerdo representa as galáxias observadas por Hubble (Fonte: adaptada de Ferris, pág. 157). O diagrama à direita foi produzido somente com medidas de variáveis Cefeidas feitas pelo Telescópio Espacial Hubble. (Fonte: **http://hubblesite.org/newscenter/archive/1999**).

Raciocínio semelhante é usado para o cálculo da intensidade aparente e sua relação com a luminosidade intrínseca de um objeto distante. Sabendo que há um decréscimo na intensidade em função da distância da fonte, e que há um aumento adicional em função da expansão do Universo, podemos escrever a relação entre o fluxo recebido na Terra e a luminosidade intrínseca emitida pela fonte, incluindo o efeito do *redshift,* da seguinte forma:

$$F_{obs} = \frac{L_{fonte}}{4\pi D^2(1+z)^2}$$

em que o termo $D^2(1+z)^2$ é conhecida como *distância de luminosidade*.

9.2.4 CONTAGEM DE GALÁXIAS

Um outro teste cinemático é baseado na contagem dos objetos cosmológicos dentro um dado intervalo de *redshifts*. Seja N(z) o número de galáxias por unidade de volume em um determinado redshift z. Supondo que esse número é espacialmente uniforme, o número de galáxias distribuídas no intervalo de redshifts entre z e z + Δz, dentro de um ângulo sólido $\Delta\Omega$ é:

$$\frac{dN}{d\Omega dz} \propto \frac{N(z)}{(1+z)^3}$$

As expressões para as relações de diâmetro angular, luminosidade e contagem de galáxias podem, todas, ser reescritas colocando-as em termos dos parâmetros cosmológicos primários, que serão apresentados **na seção 9.3.2.**

9.2.5 O ARCABOUÇO TÉORICO DE FRIEDMANN, LEMAITRE, ROBERTSON E WALKER

Até cerca de 1950, a Cosmologia era uma ciência essencialmente teórica, com praticamente nenhum suporte observacional ou atividade experimental que pudesse validar os modelos de Universo então vigentes. Esses modelos possuíam as mais diversas características e a imensa maioria evoluiu a partir das soluções das equações propostas por Albert Einstein em 1915, como parte da sua TRG, para descrever o movimento de corpos em referenciais acelerados. A versão mais completa, em formato tensorial das equações tem a forma:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}.$$

em que $\mathbf{g_{\mu\nu}}$ é o tensor que define a métrica do espaço-tempo, $\mathbf{R_{\mu\nu}}$ é o tensor de curvatura de Ricci, **R** é o escalar de curvatura, **Λ** é a constante cosmológica, $\mathbf{T_{\mu\nu}}$ é o tensor stress-energia, **G** é a constante de gravitação e **c** é a velocidade da luz. Esse conjunto de equações foi resolvido em 1922, para um universo homogêneo e isotrópico em expansão, no contexto da TRG, por Alexander Friedmann (1888 – 1925), resultando nas chamadas equações de Friedmann, descritas na próxima seção.

O abade Georges Lemaitre (1894 – 1966) também trabalhou na compreensão das equações de Einstein e foi o primeiro a propor a teoria da expansão do Universo, erroneamente atribuída a Edwin Hubble. Ele foi o primeiro a deduzir o que é hoje conhecido como Leio de Hubble e fez as primeiras estimativas da constante de Hubble, publicadas em 1927, dois anos antes do artigo de Hubble. Lemaitre também propôs o que posteriormente ficou conhecido como o modelo do Big Bang sobre a origem do Universo, chamado por ele de "hipótese do átomo primordial" ou "Ovo Cósmico".

Ao descrever fenômenos no espaço tridimensional, utilizamos um sistema de coordenadas que caracteriza univocamente a posição de um corpo neste espaço. Em coordenadas cartesianas, provavelmente mais conhecidas do leitor, o elemento de linha que descreve a trajetória de um objeto no espaço Euclidiano é escrito como:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Coordenadas esféricas (r, θ, φ) permitem descrever de maneira mais adequada a trajetória de um objeto em uma geometria esférica. Nesse caso, a equação (2) assume a forma:

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sen^2\theta d\phi^2.$$

Se mantivermos r constante, o objeto somente se movimenta sobre uma superfície esférica. Caso r varie, teremos movimento "para dentro" ou "para fora" da superfície.

Ao descrever fenômenos que variam no espaço e no tempo, devemos incluir uma variável temporal no elemento de linha Euclidiano, transformando a equação (2) em:

$$ds^2 = cdt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

ou

$$ds^2 = c^2dt^2 - (dr^2 + r^2d\theta^2 + r^2sen^2\theta d\phi^2).$$

Em geral, relações que descrevem a distância ***ds*** entre dois pontos no espaço são chamadas de *métricas*. As métricas (4) e (5) são também conhecidas como métricas de Minkowski, bastante usadas em cálculos na Teoria da Relatividade Restrita. Como tentamos descrever o Universo com modelos baseados na **TRG**, é necessário que sejamos capazes de incluir a forma do espaço-tempo que descreve o Universo na métrica desejada. Como veremos mais à frente, supomos, como hipótese de trabalho, que o Universo é homogêneo e isotrópico.

De várias métricas possíveis, existem somente três que satisfazem às condições de homogeneidade e isotropia: um Universo plano (ou Euclidiano, em que a soma dos ângulos internos de um triângulo é igual a 180 graus), um Universo aberto (em que a mesma soma é menor que 180 graus) ou um Universo fechado (em que a soma é maior que 180 graus). Sem entrar em detalhes, vamos mencionar que a métrica que incorpora essas três possibilidades foi descrita na década de 30 por Howard Robertson (1903 – 1961) e Arthur Walker (1909 – 2001) e é conhecida por métrica de Robertson-Walker:

$$ds^2 = c^2dt^2 - R(t)^2(\frac{dr^2}{1-\kappa r^2} + r^2d\theta^2 + r^2sen^2\theta d\phi^2).$$

Ela incorpora as três possibilidades de curvatura na variável **κ**, e a expansão do Universo, no termo **R(t)**, também chamado “fator de escala”. É ele quem descreve se distâncias cósmicas estão aumentando ou diminuindo com o passar do tempo. Podemos imaginar essa métrica como uma extensão da métrica de Minkowski para um espaço homogêneo e isotrópico, não plano e não estático.

As equações de Einstein (1) relacionam a evolução de R(t) com a pressão e a energia expressa em Tμν. Usando a métrica de Robertson-Walker, os termos de (1) são calculados explicitamente e, considerando que a energia no Universo pode ser tratada como um fluido perfeito, substituímos esses valores em (1) e o resultado são as chamadas equações de Friedmann, que descrevem um fluido homogêneo num Universo homogêneo e isotrópico em expansão:

$$\begin{aligned} (\frac{\dot{R}}{R})^2 &= \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{\Lambda c^2}{3} + (\frac{\kappa c}{R})^2 \\ (\frac{\ddot{R}}{R}) &= -\frac{4\pi G\rho}{3}(\frac{\rho + 3p}{c^2}) + \frac{\Lambda c^2}{3} \end{aligned}$$

Na equação (7a), o termo à esquerda descreve, de forma simplificada, a energia cinética da expansão, com dimensão de (velocidade)^2. O lado direito possui diversos termos de inércia, caracterizando, de forma simplificada, as energias potenciais dos diversos parâmetros cosmológicos: a matéria-energia, representada por $\boldsymbol{\rho}$, a energia do vácuo (sobre a qual falaremos quando tratarmos de energia escura), representada por Λ e a curvatura, representada por κ^2.

A segunda equação (7b) descreve a aceleração do Universo, e resume a física que governa a expansão, em que p a é pressão de radiação e ρ é a densidade de matéria-energia. No caso de $p \ll \rho$, o Universo é desacelerado pela presença de matéria (caso em que o Universo será não relativístico). Para um universo dominado por matéria relativística ($p = \rho/3$), a desaceleração será o dobro do caso não relativístico. No caso de $p = -\rho$, o Universo é dominado pela energia do vácuo (em que Λ assume o papel da chamada Energia Escura), ocorrendo a aceleração da expansão.

9.3 O UNIVERSO PRIMORDIAL

9.3.1 COMPOSIÇÃO

O cenário previsto pelo MCP sugere que o Universo foi **criado** há cerca de 14 bilhões de anos, a partir de um estado de densidade, temperatura e pressão extremamente altas. Esse evento é conhecido como Big Bang (Grande Explosão) e considera-se que o Universo começou a expandir-se e resfriar-se a partir desse instante, considerado o “instante zero (t=0)”. Todas as referências a intervalos de tempo cosmológicos são, em geral, feitas em relação ao “instante zero”.

Até cerca de 0,01 segundos, a temperatura era muito alta e havia formação e aniquilação incessante de pares de partículas elementares. Essa época era conhecida como a “fase hadrônica”, quando o plasma de quarks e glúons (constituído dos pares acima mencionados) transformou-se em “hádrons” após a temperatura cair para valores abaixo de 1 bilhão de graus K. Nesse momento, a produção e aniquilação de pares e as reações nucleares cessaram, deixando como resultado elétrons, prótons e nêutrons (nossos conhecidos, que formam a matéria comum que constitui a Terra e as moléculas orgânicas presentes nos organismos vivos). Também restaram fótons e neutrinos, partículas difíceis de serem detectadas e que possuem massa extremamente pequena (cujo valor foi recentemente estimado), e carga elétrica nula. A composição do Universo hoje inclui hádrons (prótons e nêutrons), léptons (elétrons e neutrinos), radiação e duas componentes desconhecidas, a Matéria Escura e a Energia Escura, que constituem a maior parte dessa composição. A proporção das componentes do Universo está

representada na **Figura 9.4**. Note o disco à direita, que representa TUDO o que pode ser diretamente observado por emissão de radiação eletromagnética no Universo.

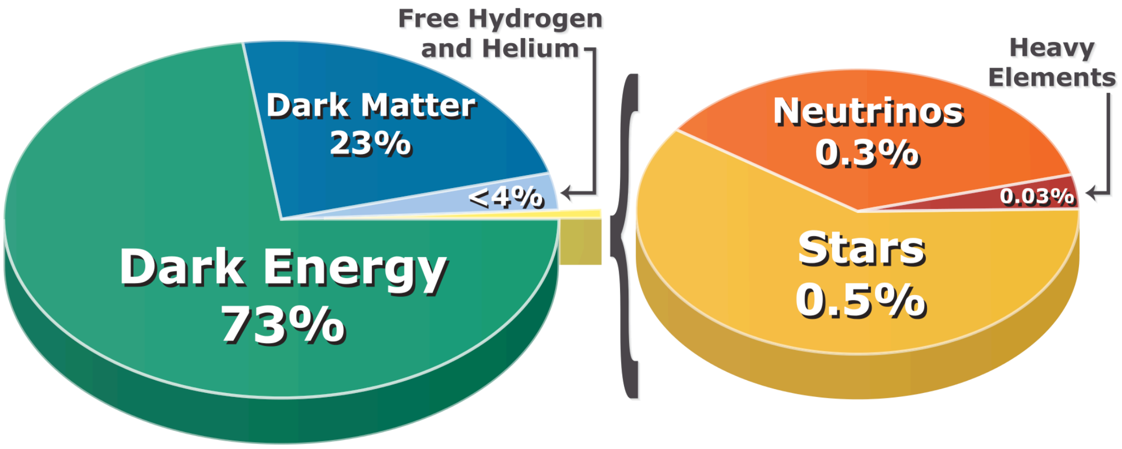

Figura 9.4 – Esquerda: Distribuição das componentes do Universo; Direita: distribuição de matéria ordinária, considerando bárions e léptons (neutrinos). Fonte: Wikimedia Commons (2017)

9.3.2 UMA BREVE HISTÓRIA TÉRMICA

A temperatura da RCFM diminui com a expansão do Universo e está diretamente ligada ao *redshift* pela relação

$$T_{RCFM}(z) = T_{RCFM_0}(1+z).$$

e pode usada como alternativa ao tempo ou ao *redshift* para parametrizar a história do Universo. Os principais eventos da história térmica do Universo são:

- $t < 10^{-43}$ s ($E > 10^{19}$ GeV) – momentos próximos à chamada escala de Planck, em que a relatividade geral deixa de ser válida, e o Universo encontra-se no regime da gravitação quântica. A questão do que é a singularidade de onde o Universo foi formado é extremamente importante neste regime;
- 10^{-43} – 10^{-14} s (10^{19} GeV – 10 TeV) – a energia disponível logo após a separação da força gravitacional das outras forças, em ~ 10^{-43} s e, nesse período o Universo entra no regime da relatividade geral, embora sua composição "química" seja incerta. O processo de expansão inflacionária, que será descrito adiante, ocorre nesse intervalo ($t \sim 10^{-33}$ s), bem como o surgimento da assimetria matéria – antimatéria;
- 10^{-14} – 10^{-10} s (10 TeV – 100 GeV) – nesse regime o modelo em que as forças eletrofraca e nuclear forte é válido e as reações que ocorrem nesse intervalo de energias pode ser reproduzido nos aceleradores de partículas atuais;
- 10^{-5} s (~ 200 MeV) – a transição glúon – quark ocorre nessa faixa de energias, confinando-os em bárions e mésons e criando os prótons e nêutrons usados na

nucleossíntese primordial;

- 0,2 s (~ 1 – 2 MeV) – os neutrinos primordiais desacoplam-se das demais partículas nessa época e a razão entre prótons e nêutrons é estabilizada. O número de nêutrons livres nessa época determina a abundância dos elementos leves descrito na **sec. 9.3.4.**
- 1 s (~ 0,5 MeV) – a energia disponível é da ordem da massa de repouso dos elétrons e pósitrons. A aniquilação de pares deixa um excesso residual de elétrons sobre pósitrons, da ordem de 1 elétron para cada bilhão de fótons produzidos, que encontram-se em equilíbrio térmico;
- 200 – 300 s (~ 0,005 MeV) – a energia disponível favorece as reações nucleares e permite a junção de prótons e nêutrons livres em átomos de Deutério, Hélio e Lítio;
- 10^{11} s (~ 1 eV) – essa época corresponde à igualdade entre as densidades de matéria e radiação, separando as épocas de dominação de cada uma sobre a dinâmica do Universo;
- 10^{12} – 10^{13} s (< 0,1 eV) – nessa época, prótons e elétrons que se encontravam livres até então passaram gradualmente a se combinar para formar átomos de Hidrogênio. Com a combinação, o processo de interação entre fótons e elétrons, conhecido como espalhamento Thomson, tornou-se insignificante e o Universo tornou-se transparente à radiação (**Figura 9.5**). A trajetória de um fóton, antes limitada devido às colisões sucessivas com os elétrons livres, passou a ser da mesma ordem de grandeza do Universo. Este processo é conhecido como *desacoplamento*.

Figura 9.5 –À esquerda, o acoplamento causada pelo espalhamento Thomson obriga os fótons a percorrerem um caminho aleatório. Após a recombinação (à direita), os fótons podem ser propagar livremente pelo Universo. Fonte: http://universeadventure.org.

- 10^{16} – 10^{17} s (T < 10 K) – início da formação de estruturas a partir das flutuações de densidade primordial, como consequência das instabilidades gravitacionais. Duas questões não resolvidas aparecem nessa época: a natureza da matéria e da energia escuras.

A temperatura dos fótons da RCFM **decresce** proporcionalmente à taxa de expansão do Universo, mas mantendo suas características. Hoje sua temperatura é de ~ 2,7260 K, praticamente uniforme em todo Universo e nos permite estimar que o aumento relativo do tamanho do Universo nesse período, considerando que a temperatura na época do desacoplamento entre a matéria e a radiação era cerca de 3000 K, foi de um fator 1000 (~ 3000/3). Logo, o Universo hoje é mil vezes maior que na época da recombinação.

A **Figura 9.6** apresenta um resumo da história térmica, com os equivalentes em energia, temperatura e tempo. Conforme olhamos para pontos mais distantes do vértice, olhamos para objetos mais distantes de nós e, como consequência, cada vez mais jovens.

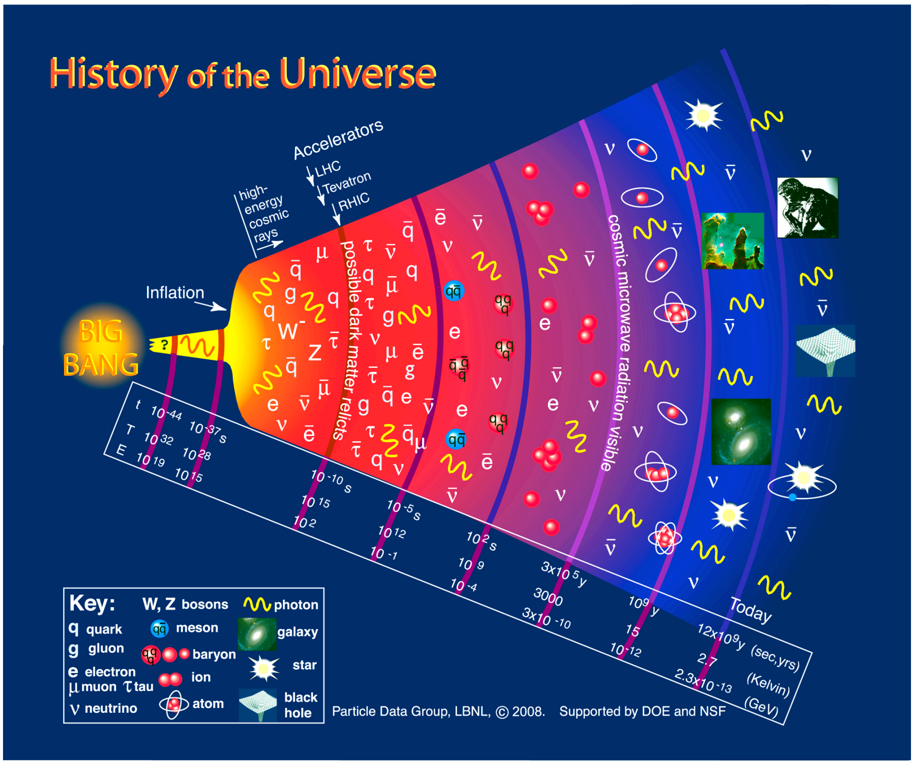

Figura 9.6 – Diagrama descritivo da história do Universo. Os números na parte inferior descrevem, respectivamente, o tempo (época) e a energia (temperatura) correspondentes a cada evento. Cada linha magenta representa um grande evento na história cósmica. Da esquerda para a direita: época da Grande Unificação (10^{-44} s); inflação (10^{-32} s); desacoplamento das forças eletrofraca e forte (10^{-10} s); nucleossíntese primordial (entre 10^{-2} s e 180 s); desacoplamento matéria-radiação (3×10^{5} anos); formação de estruturas (1×10^{9} anos); época atual (12×10^{9} anos). Fonte: Particle Data Group, LBNL (2008).

9.3.3 INFLAÇÃO

O Universo observável hoje é extremamente homogêneo e isotrópico e é difícil explicar porque partes do Universo muito distantes, e sem nenhuma conexão causal (ou seja, situadas a distância maior do que o raio do Universo hoje) que possa justificar essa

isotropia, tem as mesmas propriedades globais. Isso é conhecido, entre os especialistas, como *a questão do horizonte*.

A relação entre a lei de Hubble, que governa a expansão do Universo, e a gravidade, que a desacelera, também parece ser extremamente bem ajustada. Um pequeno desvio nesse balanço entre energia cinética e potencial poderia causar um colapso imediato do Universo ou uma expansão tão rápida que não haveria tempo de formar estruturas. Assim, a densidade do Universo (que, de forma simplificada, pode ser comparada à razão entre as energias cinética e potencial) tem que ser igual à unidade. A implicação disso é que o Universo deve ser plano. No jargão cosmológico, esse é o chamado *problema da planura*.

A proposta de um Universo em expansão extremamente rápida, num intervalo de tempo extremamente curto, é possível se, nesse tempo, a gravidade exerça uma pressão negativa acelerando o Universo, de forma que o fator de escala $a \sim e^{t/T}$, em que t é o tempo próprio do Universo e T é a temperatura (ou energia média). Esse processo é chamado de Inflação, e foi inicialmente proposto por Alan Guth (1947 –) e Paul Steinhardt (1952 –) em 1980. A Inflação deve ter ocorrido entre 10^{-34} s e 10^{-32} s, causando o aumento do raio do Universo por um fator $\sim e^{100} \sim 10^{43}$ (10^{-26} m para $\sim 10^{17}$ m).

A Inflação permite que os problemas da planura e do horizonte sejam resolvidos de uma forma elegante, fazendo com que regiões causalmente desconectadas no Universo hoje possam apresentar as mesmas propriedades, uma vez que, antes da Inflação, elas estavam em contato causal. A definição mais geral de Inflação é “uma época de expansão exponencial do Universo, quando a gravidade atua como uma força negativa”.

Alguns problemas, entretanto, surgem ao adotarmos a ideia de um Universo Inflacionário. Por exemplo, como explicar porque a gravidade torna-se repulsiva durante um infinitésimo de segundo? Qual seria o mecanismo disparador do processo inflacionário? Os modelos de física de partículas conseguem explicar a energia necessária para essa aceleração em termos da relação entre pressão e densidade existente na eq. de Friedmann (7b).

Por outro lado, uma das grandes previsões da Inflação, confirmada na década seguinte, é que deveria haver pequenos desvios dessa homogeneidade em grande escala, e que essas “perturbações” deveriam ter um espectro característico, que são vistas hoje diretamente como as perturbações da RCFM. Sua origem são as flutuações quânticas, presentes no fluido matéria-radiação; durante a Inflação seus comprimentos de onda são amplificados como todo o resto do Universo, tornando-se macroscópicos. O resultado hoje é um espectro de flutuações de matéria com basicamente as mesmas propriedades em num enorme intervalo de comprimentos de onda, ou *invariantes em escala.*

As perturbações produzidas durante o processo inflacionário são do tipo escalar (que estão correlacionadas com as flutuações de temperatura da RCFM) e tensoriais (correlacionadas com ondas gravitacionais) e que produziriam um certo tipo de polarização na RCFM conhecido na literatura como modos B, ou rotacionais.

9.3.4 NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL

Embora a análise espectral da luz emitida por estrelas e galáxias seja dominada por elementos mais pesados que o Hidrogênio e o Hélio, aqueles são muito mais raros do que os dois mais leves. Comparativamente, menos de 2% da massa da Galáxia é composta de elementos mais pesados que o Hélio. Pode-se aproximar essa abundância dizendo que, se pesarmos toda a massa disponível no Universo, cerca de 75% é Hidrogênio, 24% é Hélio e 1% corresponde a todo o resto dos elementos presentes na natureza. Os físicos e cosmólogos acreditam que a razão da composição química do Universo ser assim é porque Hidrogênio e Hélio foram criados nos primeiros instantes do Universo.

O processo de criação, que ocorreu de ~ 0,01 s a ~ 200 s, dependia das fases anteriores, em que a quantidade de elétrons, neutrinos, prótons e nêutrons livres ditaram a taxa de reações. Particularmente, a diferença de massa entre próton e nêutron, e o fato de nêutrons livres terem uma meia vida bastante curta (cerca de 10 minutos), combinados com a expansão do Universo, definiram a composição química inicial. Um Universo com a taxa de expansão diferente ou com um valor da constante de estrutura fina $\alpha \neq 1/137$ certamente teria uma outra forma.

A primeira análise das condições extremas do Universo jovem foi feita por George Gamow (1904 – 1968) e colaboradores, em 1948, que descobriram que a composição do Universo jovem não deveria conter outros elementos além do H, D, He e Li. Os cálculos atuais indicam que sua distribuição obedece às proporções mostradas na **Figura 9.7**. É sabido pelos astrônomos que praticamente todos os elementos mais pesados que o Hélio são formados no interior das estrelas, durante as reações nucleares que as fazem brilhar, ou na fase de supernovas, quando os elementos mais pesados que o Ferro (até o Urânio) são sintetizados.

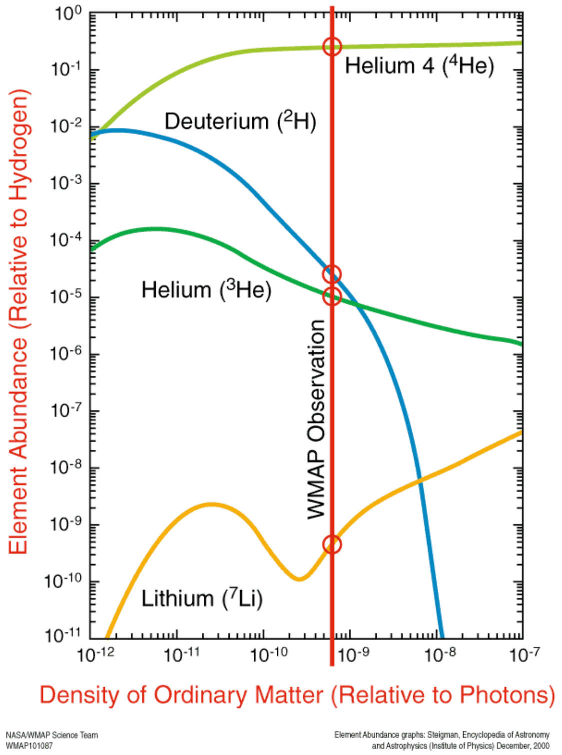

Figura 9.7 – Abundância relativa dos elementos leves em relação ao Hidrogênio. A linha vermelha central define os valores para cada um dos elementos, estimado a partir de medidas do satélite WMAP, considerando que a descrição do Universo concorda com o MCP (Fonte: https://map.gsfc.nasa.gov/).

O trabalho teórico sobre a nucleossíntese explicou completamente a origem dos primeiros elementos mais pesados que o Hidrogênio e somente restou uma explicação cosmológica para a abundância observada do Hidrogênio e do Hélio. A teoria de Gamow aplicada ao MCP fornece a proporção exata observada dos dois elementos, sendo que o momento da formação ocorreu nos primeiros minutos depois do Big Bang, quando a temperatura era da ordem de 1 bilhão de graus Kelvin. As observações da abundância de Hélio no Universo atual permitem determinar, indiretamente, as condições físicas cerca de dois a três minutos após a criação do Universo. A partir desse ponto "para trás", isto é, na direção do "instante zero", somente podemos deduzir algo sobre o Universo através de cálculos, simulações e especulações teóricas.

9.3.5 A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS

A RCFM é uma forte evidência de que o Universo, em uma época distante no passado, era muito mais denso e quente do que é hoje. Para produzir uma radiação com suas características, o Universo deveria ser completamente diferente do que vemos hoje nos céus. Nessa época não existiam ainda planetas, estrelas e galáxias, pois o Universo estava completamente preenchido pelo "plasma primordial", constituído somente de radiação e partículas elementares extremamente quentes. Sua descoberta em 1964

trouxe uma nova era de observações para confrontar os modelos cosmológicos, até então praticamente restritos a considerações teóricas.

A RCFM, formada cerca de 380 mil anos após o Big Bang, foi-se resfriando por causa da expansão e hoje a temperatura medida é de 2,726 K. Essa temperatura corresponde à faixa de micro-ondas no espectro eletromagnético e é praticamente uniforme em todas as regiões do céu. Além disso, a potência dessa emissão é distribuída num grande intervalo de frequências, ao invés de estar concentrada numa única frequência, como acontece com um transmissor de rádio normal.

Medidas da RCFM são feitas num intervalo entre dezenas e centenas de GHz, em toda a esfera celeste, preferencialmente fora do plano da Via Láctea. Das medidas feitas desde sua descoberta, em 1964, concluímos que ela tem praticamente as mesmas características de quando foi criada, exceto pela temperatura, que diminuiu por causa da expansão do Universo. A evolução posterior do Universo, durante o processo de formação de estruturas não afetou significativamente as propriedades a RCFM, de modo que a temperatura hoje pode ser relacionada com a temperatura em um *redshift,* como descrito anteriormente.

A RCFM é considerada um resíduo cósmico praticamente intocado e nos oferece uma excelente oportunidade de estudar os detalhes do Universo jovem. Os mecanismos de origem e evolução das estruturas que vemos hoje no Universo estão diretamente ligados às condições físicas no Universo jovem, impressas nas características da RCFM, de modo que estuda-la ajuda nossa compreensão daqueles processos. A RCFM pode ser estudada através de seu espectro, sua distribuição angular de temperatura e sua polarização.

O MCP prevê que a RCFM deve apresentar um espectro conhecido como *espectro de corpo negro*, cuja forma depende somente da temperatura do corpo emissor, descrito como um conjunto de medidas da intensidade em diferentes frequências. O melhor resultado até a presente data foi obtido pelo satélite COBE, em 1994, e pode ser visto na **Figura 9.8**.

A medida do espectro indica que a temperatura da RCFM é de ~ 2,726±0,001 K com o pico de emissão na faixa de micro-ondas. Como exemplo comparativo, o espectro de corpo negro do Sol, cuja temperatura é de 6000 K, possui o pico numa frequência correspondente à luz visível. O comportamento quase perfeito de corpo negro da RCFM indica que houve poucos fenômenos globais que afetassem o equilíbrio termodinâmico entre radiação e partículas antes de 380.000 anos.

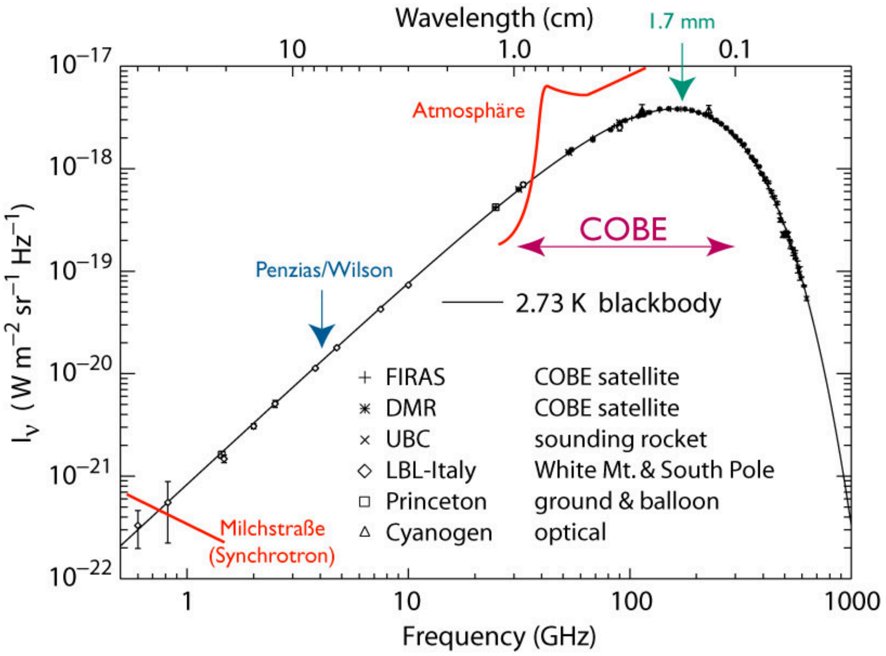

Figura 9.8 – Espectro de corpo negro teórico com T = 2,726 K, superposto a medidas feitas por diferentes instrumentos no solo, a bordo de balão, a bordo de foguete e a bordo do satélite COBE. O pico encontra-se próximo da freqüência de 200 GHz. A escala de intensidade no eixo Y é de intensidade por ângulo sólido por frequência. Fonte: https://inspirehep.net/record/1295471/plots.

O estudo da distribuição angular da RCFM mostra a existência de pequenas flutuações de temperatura em torno de 2,7 K. Essas flutuações, ou *anisotropias*, contém informação sobre a distribuição de matéria no Universo jovem. Sua amplitude é da ordem de uma parte em 100.000, ou 10^{-5}. Podemos fazer uma comparação para ilustrar essa diferença. Se pudéssemos esticar "perfeitamente" um lençol de 1 km x 1 km, ao observa-lo de longe, teríamos a sensação de que ele não possui nenhuma ruga ou amassado. Isso é o equivalente a observar a distribuição de 2,7 K na RCFM. As flutuações de temperatura corresponderiam a pequenas ondulações no lençol, de poucos centímetros de amplitude. Apesar de sua baixa amplitude, são elas que deram origem às estruturas extremamente complexas que observamos hoje no Universo.

Em 1992, o satélite COBE (**Co**smic **B**ackground **E**xplorer), lançado pela NASA com o propósito de estudar as características da RCFM detectou, de maneira conclusiva, que a distribuição de temperatura da RCFM apresenta anisotropias da ordem de 10^{-5} (**Figura 9.9, superior**). Logo após o resultado do COBE, diversos experimentos confirmaram a existência de flutuações na RCFM em diferentes escalas angulares. Em 2003 e 2013, os satélites WMAP (**W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe, da NASA) e Planck (da Agência Espacial Européia – ESA) publicaram resultados que mostram, em muito mais detalhes, exatamente o mesmo tipo de estrutura medida pelo COBE em 1992 (**Figura 9.9, centro e em baixo**).

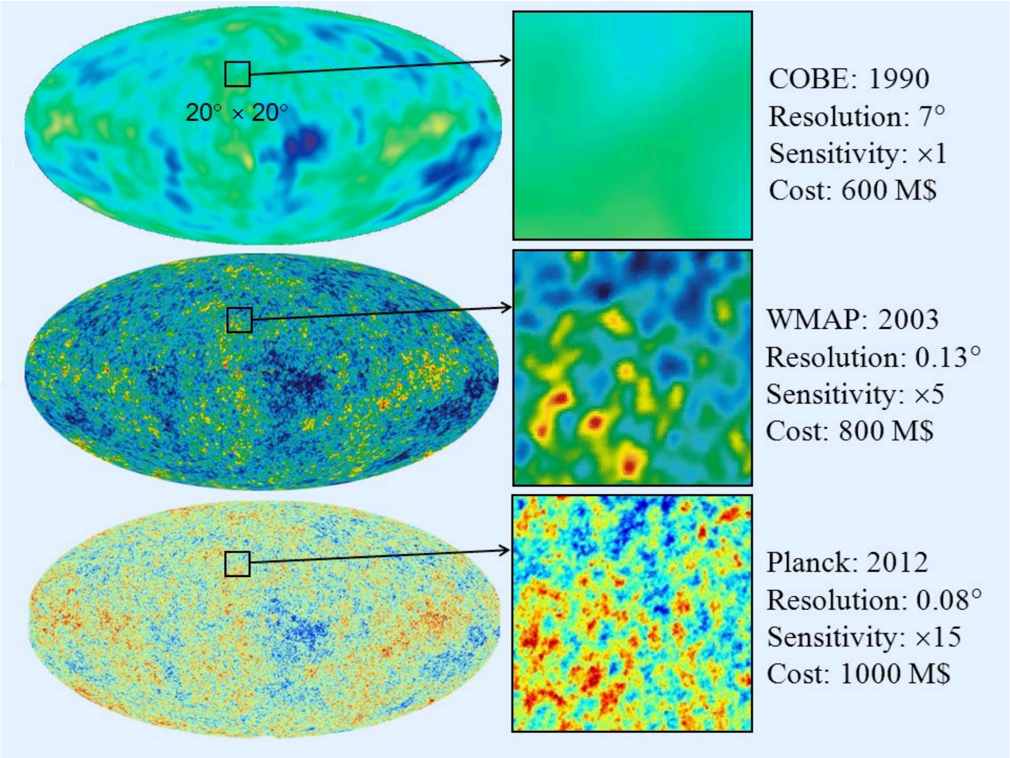

Figura 9.9 – Comparação entre os mapas das flutuações de temperatura feitos pelos três satélites dedicados a medir a RCFM. As manchas azuis (mais frias) e vermelhas (mais quentes) correspondem às flutuações de temperatura no Universo jovem. Deve-se notar o aumento de qualidade dos mapas, correspondentes à melhor resolução dos detectores. Fonte: http://slideplayer.com/slide/10583101.

Devido ao acoplamento entre matéria e radiação no Universo jovem, esperava-se que existissem oscilações, equivalentes as ondas acústicas, no fluido. A distribuição das anisotropias da RCFM apresenta uma série de picos, chamados de picos acústicos, descritos como um oscilador harmônico amortecido (**Figura 9.10**). Esses picos, cuja posição e amplitude variam em função da escala dos processos físicos, contêm informações sobre a quantidade e o tipo de matéria que constitui o Universo, sua idade e sua geometria.

A terceira característica da RCFM é a existência de um grau de polarização na distribuição angular, devido a diferentes processos físicos: espalhamento devido à interação dos elétrons com os fótons na última superfície de espalhamento (espalhamento Thomson), injeção de radiação durante a formação das primeiras estrelas e a distorção do espaço-tempo causada por ondas gravitacionais produzidas durante a Inflação.

Uma onda eletromagnética é dita linearmente polarizada quando o seu campo elétrico se encontra oscilando sempre numa mesma direção. Caso a direção varie com o tempo, a onda será circularmente polarizada. Em geral, um campo de radiação qualquer, que é a superposição de ondas eletromagnéticas polarizadas em todas as direções, apresenta

apenas uma porcentagem de sua intensidade total com uma polarização bem definida, gerando um padrão que pode ser mapeado.

Figura 9.10 – Espectro de potência angular das flutuações de temperatura da RCFM. Em destaque encontram-se os picos acústicos, causados por diferentes processos físicos antes e durante o período da recombinação. Fonte: Autoria própria.

O padrão de polarização observado segue o padrão das flutuações observadas na RCFM. Os primeiros resultados de medidas de polarização só foram anunciados em 2002, apesar de as primeiras tentativas para detectá-la terem começado na década de 70. Para a RCFM, esta fração polarizada corresponde de 0,1% a 1% da amplitude das flutuações de temperatura, dependendo do processo físico que deu origem à polarização.

A distribuição da polarização no plano do céu pode ser sempre decomposta em uma componente gradiente e uma componente rotacional, da mesma forma que um campo vetorial pode ser descrito pela soma dos termos gradiente e rotacional. Essa técnica é extremamente útil pois os processos físicos que geram polarização produzem componentes rotacional, ou tensorial (ondas gravitacionais) e gradiente, ou escalar (espalhamento Thomson).

Fenômenos presentes no momento da recombinação produziram polarização escalar através do espalhamento Thomson dos fótons pelos elétrons do fluido primordial, com uma intensidade da ordem de 1%. Mais tarde, quando as primeiras estrelas de grande massa surgiram (cerca de 200 milhões de anos após o Big-Bang), a luz que elas emitiram foi capaz de ionizar as moléculas de Hidrogênio que permeavam o Universo, num processo conhecido como reionização. Os elétrons liberados durante a reionização

também interagiram com os fótons presentes no meio, inclusive aqueles da RCFM, polarizando-os numa taxa de ~ 1%, escalas angulares de vários graus.

Deformações no espaço-tempo, decorrentes da passagem de ondas gravitacionais produzidas durante a Inflação, distorcem o plasma primordial, introduzindo uma orientação na distribuição de temperatura no espaço-tempo, que é descrita por um tensor. O espalhamento dos fótons pelos elétrons nesse caso polariza a radiação por uma fração < 0,1%, devido à pequena amplitude das ondas gravitacionais. Este tipo de polarização tem características distintas e permitem uma completa caracterização das ondas gravitacionais que a produziram.

O padrão de polarização gradiente (ou escalar) da RFCM, feito com os dados de 5 anos coletados pelo satélite WMAP, é representado pelos segmentos de reta pretos, sobre a distribuição das flutuações de temperatura (**Figura 9.11**). Já uma simulação dos modos rotacionais (ou tensoriais) pode ser vista na **Figura 9.12**.

9.4 O UNIVERSO NÃO-HOMOGÊNEO

Uma das sugestões mais atraentes (e também a mais simples) para explicar o processo de formação de estruturas é considerar que a gravidade causou a aglutinação de matéria em regiões que, após o desacoplamento entre matéria e radiação, eram inicialmente um pouco mais densas que suas vizinhanças. Durante milhões e milhões de anos, esse processo foi acontecendo, sem interrupção, e foi comprimindo essas regiões porque, à medida que mais matéria ia sendo trazida, a gravidade tornava-se mais e mais forte, até que galáxias e outros objetos começaram a se formar.

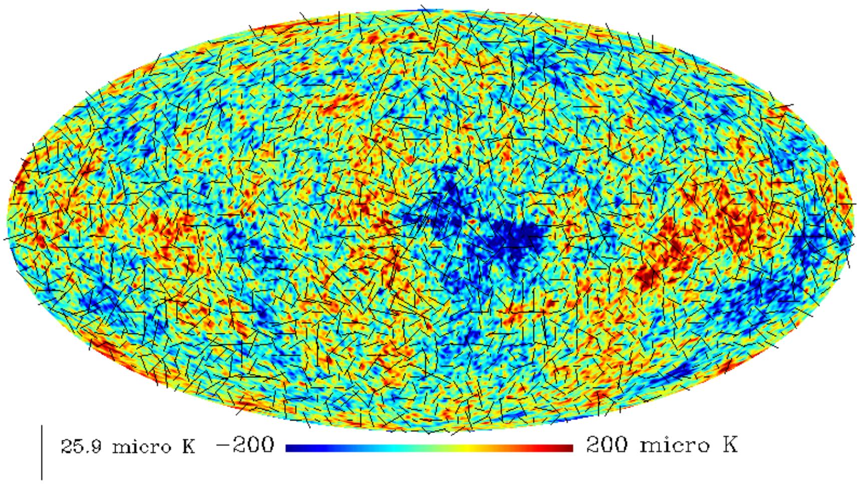

Figura 9.11 – Mapa de flutuações de temperatura da RCFM, com resolução angular de 1°, contendo os segmentos de reta superpostos às flutuações, produzido com os dados de 5 anos do satélite WMAP. Fonte: Kim *et al.* ArXiv:0810.4008 [astro-ph] (2008).

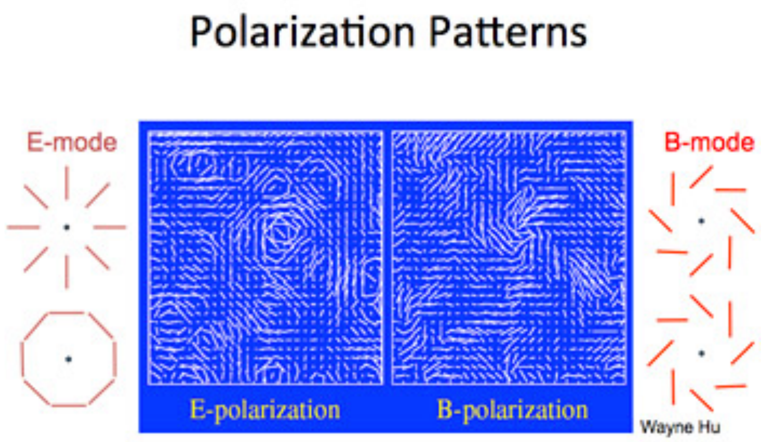

Figura 9.12 – O padrão gradiente (escalar) é chamado de modo E (E-mode) no jargão dos pesquisadores da RCFM. O padrão escalar é simétrico, refletindo as condições físicas que o geraram (espalhamento Thomson). O padrão rotacional (tensorial) indica uma distorção da radiação devido à interação com objetos massivos pelos quais ela passou (ou pela altíssima densidade do Universo primordial, onde ela também pode ter sido gerada), permitindo o mapeamento da distribuição de matéria ao longo do caminho ótico da RCFM. Fonte: Wayne Hu (2001).

A dinâmica do Universo representado pelo MCP parte da TRG, o suporte observacional é dado pelas observações da RCFM, da velocidade de recessão das Galáxias, da expansão acelerada hoje observada no Universo e pela abundância de elementos leves (H, He, D, Li). O paradigma da instabilidade gravitacional é responsável por utilizar as flutuações de matéria para formar as estruturas que observamos e consideramos que essas flutuações, não importa o tamanho, tem essencialmente a mesma amplitude.

As perguntas que o MCP deixa sem resposta, entretanto, são tão interessantes quanto as que ele responde: porque a geometria do Universo deve ser aproximadamente plana? Por que a RCFM apresenta flutuações tão pequenas? Quem gerou as flutuações de densidade que evoluíram para formar as estruturas? Onde estão as partículas estranhas, previstas pela Física de Partículas e provavelmente criadas no Universo jovem? As respostas a essas perguntas são tratadas como uma extensão ao MCP e, apesar de interessantes e parcialmente respondidas no contexto do Universo Inflacionário, não serão discutidas nesse texto.

9.4.1 COLAPSO GRAVITACIONAL

Conforme mencionamos anteriormente, observamos que as galáxias distantes estão se afastando umas das outras e deduzimos que o Universo está em expansão. Isso nos leva a pensar que o Big Bang foi o começo de tudo. As principais motivações da Cosmologia são medir tamanho, idade e forma do Universo. Por tamanho entendemos a maior distância que podemos estudar; a idade é contada em relação ao instante zero e a forma está ligada à geometria do Universo, definida pela quantidade de matéria existente.

A Cosmologia tenta traçar um perfil da evolução do Universo da época densa e quente, quando o Universo era composto de uma mistura de gás e radiação em equilíbrio térmico, para o estado extremamente complexo e diversificado que vemos hoje, com galáxias, estrelas e planetas concentrados em certas partes do céu e regiões vazias em outras. As grandes estruturas observadas no céu hoje (aglomerados e superaglomerados de galáxias) parecem ter sido formadas a partir de pequenos desvios do equilíbrio no Universo jovem e a força da gravidade fez com que regiões mais densas (com mais matéria) se expandissem mais lentamente e, colapsando sob o efeito de sua própria gravidade, se aglutinassem para formar os primeiros objetos. Ainda hoje, sabemos pouco sobre esse processo de evolução.

Resultados dos satélite WMAP e Planck indicam que a formação dos primeiros objetos ocorreu cerca de 100 – 200 milhões de anos após o Big Bang, e daí para formação das primeiras galáxias, foram mais algumas centenas de milhões de anos. Acredita-se também que o processo de formação aconteceu das pequenas para as grandes estruturas, com estrelas se formando primeiro e juntando-se posteriormente para formar galáxias (uma evolução hierárquica conhecida como *bottom-up*).

O entendimento atual é que as grandes estruturas se formaram a partir do colapso inicial da matéria escura, interagindo somente através da gravidade. Embora o tratamento completo do colapso exija o uso da TRG, uma compreensão razoável do fenômeno pode ser obtida usando-se o formalismo mais simples, baseado nas leis de Newton.

Podemos considerar o contraste de densidade $\delta\rho/\rho$, em que ρ é a densidade de matéria, para descrever os cenários de colapso gravitacional. O regime em que $\delta\rho/\rho \leq 1$ é um regime linear, quando as perturbações crescem lentamente. Quando $\delta\rho/\rho > 1$, o crescimento das perturbações torna-se não linear, desacoplando-se da expansão cósmica em que estava contido até então, formando as estruturas singulares, independentes e gravitacionalmente ligadas que são observadas hoje.

As questões a serem respondidas sobre o colapso gravitacional das perturbações de densidade primordial dizem respeito: 1) aos mecanismos de evolução em um Universo em expansão, e 2) às condições iniciais necessárias para a formação de estruturas.

O problema do colapso pode ser abordado através do chamado formalismo de Jeans, que descreve o colapso de uma estrutura gravitacionalmente ligada, a partir da relação de dispersão

$$\omega^2 = c_s^2 \kappa^2 - 4\pi G \rho_0$$

em que c_s é a velocidade das perturbações no meio, κ é o inverso do comprimento de onda λ da perturbação ($=2\pi/\lambda$), ρ_0 é a densidade das perturbações e G é a constante de gravitação Universal. Daí, derivamos o comprimento de onda típico de uma

perturbação, λ_J, que define o tamanho típico que uma perturbação deve ter para resistir ao colapso gravitacional:

$$\lambda_J \equiv c_s(\frac{\pi}{G\rho})^{1/2}$$

A região em que a perturbação se encontra torna-se instável se $\lambda > \lambda_J$.

O passo seguinte é tratar o problema considerando que a região que pode colapsar encontra-se em um Universo em expansão, de forma que a densidade média decai com a expansão. Nesse caso, o contraste de densidade pode ser escrito como:

$$\Delta = \frac{\delta\rho}{\rho} = \frac{\rho(a) - \rho_0(a)}{\rho_0(a)} = \frac{3}{5}(\frac{\Omega_0 - 1}{\Omega_0})a$$

em que Ω_0 é a densidade crítica do Universo. O caso relativístico não será discutido nesse texto, mas podemos destacar o seguinte: o crescimento das perturbações depende do fator de escala, crescendo inversamente à variação do *redshift*, seguindo a forma:

$$\rho_o = \rho_0(t_0)a^{-3}(t).$$

As soluções para as flutuações de densidade $\delta \sim \delta\rho/\rho$, para $\lambda >> \lambda_J$ são da forma:

$$\delta_+(t) = \delta_+(t_i)(\frac{t}{t_i})^{2/3}$$

$$\delta_-(t) = \delta_-(t_i)(\frac{t}{t_i})^{-1}$$

em que a solução (+) descreve o crescimento das perturbações com o tempo. É interessante chamar a atenção para a diferença entre os colapsos estáticos e dinâmicos a partir do comprimento de onda de Jeans: a expansão do Universo retarda o crescimento exponencial das instabilidades e resulta no crescimento, para os modos instáveis, que obedece a uma lei de potência.

9.4.2 FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS

Face ao que já comentamos sobre as flutuações de densidade primordial, não é surpresa notar que galáxias existam, em sua maioria, em grupos e aglomerados. Galáxias e estruturas em grande escala são uma consequência das condições a que o Universo jovem estava sujeito. O que surpreendeu os astrônomos nas décadas de 80 e 90 não foi a existência, mas o tamanho das estruturas. Vazios típicos de até 200 milhões de anos luz e uma estrutura conhecida como “A Grande Muralha”, que se estende por mais de 500 milhões de anos luz e é a maior estrutura identificada no Universo até a presente data, são alguns dos resultados encontrados nos levantamentos de objetos distantes.

A lógica por trás do processo de formação de estruturas é que, embora galáxias distantes se afastem umas das outras à medida que o universo se expande, a gravidade atrai galáxias vizinhas entre si, formando grupos, aglomerados e enormes filamentos constituídos por centenas de milhares de galáxias. Muitas dessas estruturas são visíveis em mapas que cobrem regiões de milhares de graus quadrados no céu.

A teoria é baseada na TRG e busca resolver as equações que descrevem a evolução das perturbações de densidade do Universo. Os cálculos supõem que o Universo jovem possui perturbações aleatórias, energia escura e diversos tipos de matéria escura. As equações que descrevem o acoplamento gravitacional e outros processos físicos relevantes são resolvidas numericamente por supercomputadores. Os cálculos mostram que as flutuações crescem, conforme previsto nas teorias que envolvem instabilidades gravitacionais, conforme apresentado na seção 9.3.1. Os resultados das simulações computacionais são comparados com as observações feitas, ajustes são feitos nos modelos que os computadores produzem e os cálculos são refeitos. A análise dessas comparações também é capaz de ajudar a colocar limites nos parâmetros que descrevem a matéria escura e da energia escura no Universo.

O objetivo de mapear essas estruturas, em diferentes distâncias, é entender os processos de formação e aglomeração das estruturas do Universo. Note que aqui estamos usando, de modo pouco rigoroso, o fato de que, quanto mais longe em distância podemos enxergar, mais "para trás no tempo" estamos indo. Esses mapeamentos podem ser comparados a fotografias do Universo em diferentes épocas, permitindo mapear a evolução desde pouco depois do surgimento da RCFM (após o desacoplamento entre a matéria e a radiação), até períodos bem mais recentes, quando o Universo já estava "aglomerado", e muito mais diferenciado.

Fazer mapas de galáxias em três dimensões requer um conhecimento de quão distantes os objetos se encontram de nós. Isso é feito a partir da determinação dos *redshifts*: quanto maior o *redshift*, maior a velocidade e mais distante o objeto se encontra de nós. Hoje existem alguns levantamentos, tais como APM, 2MASS, 6dF, 2dF, SSDS, cada um com milhares a milhões de objetos mapeados. Em contraste, há 40 anos atrás, o número médio de galáxias com *redshift* conhecido era de apenas 2700.

Resultados recentes mostram evidências de que existem diversas estruturas com dimensões extraordinárias (~ 80 x 100 x 100 Mpc, ~ 70 x 140 x 140 Mpc). Existem ainda evidências, por observações da linha de emissão do Hidrogênio da série de Lyman, de que existem objetos a distâncias até 2700 Mpc, embora eles sejam poucos e espalhados pelo Universo observável (em termos de distribuição angular). As distâncias envolvidas no estudo das estruturas em grande escala variam de alguns milhões (tamanhos típicos de pequenos grupos de galáxias) a várias centenas de milhões de anos luz (distâncias da ordem da "Grande Muralha").

O primeiro dos grandes levantamentos feito de forma automatizada foi o APM (Automated Plate Measuring), liderado pela Universidade de Cambridge e publicado em 1990, por John Maddox (1925 – 2009) e colaboradores. Mais de 2 milhões de galáxias foram observadas em uma região de 100 graus de diâmetro centrada em direção ao pólo sul da Via Láctea (**Figura 9.13**). As regiões brilhantes indicam mais galáxias, enquanto as cores mais azuis indicam galáxias médias maiores. As elipses escuras excluem regiões em que as estrelas locais brilhantes dominam o céu. Muitas descobertas científicas resultaram deas análises dos dados desse mapa, incluindo o fato, confirmado posteriormente por todos os outros levantamentos, de que o universo era surpreendentemente complexo em grandes escalas.

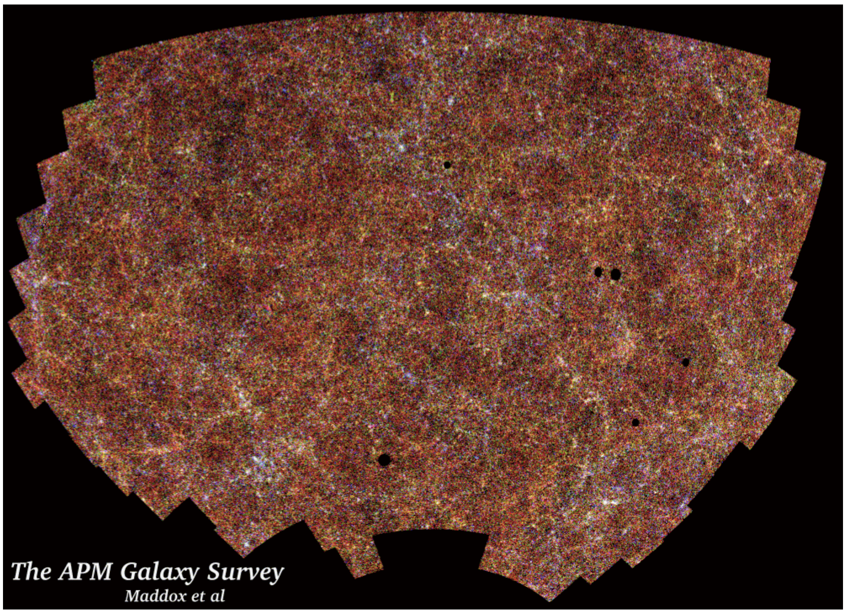

Figura 9.13 – Levantamento APM, realizado durante a década de 80, com mais de 2 milhões de galáxias observadas. Fonte: https://apod.nasa.gov/apod/image/0306/galaxies2_apm_big.gif.

A **Figura 9.14** é o resultado do levantamento de redshifts conhecido como Sloan Digital Sky Survey (SDSS), financiado pela Alfred P. Sloan Foundation e pelo Departamento de Energia (EUA) e constituído pelo Consórcio de Pesquisa em Astrofísica para as instituições participantes da colaboração SDSS. As medidas do SDSS começaram em 2000 e hoje ele se encontra na chamada Fase IV, que cobrirá o período 2014 – 2020. Os mapas mais recentes do SDSS são os DR13 (Data Release 13), liberados em 20013, tendo observado ao todo, mais de 4 milhões de espectros de ~ 1.5 milhões de galáxias e ~ 160.000 quasares.

Medidas de estrutura em grande escala com os mapas do SDSS de galáxias, quasares e gás intergaláctico tornaram-se um pilar central do modelo cosmológico padrão que descreve nossa compreensão da história e do futuro do Universo. Os dados do SDSS ajudaram a demonstrar que o Universo é dominado por matéria escura invisível e energia escura e penetrante, e semeado com estrutura por flutuações quânticas no

Universo jovem. Essas flutuações evoluíram para formar as estruturas em grande escala observadas hoje. O SDSS foi também responsável pelas primeiras medidas de oscilações acústicas de bárions (em inglês, BAO), detectadas durante a Fase I do SDSS,

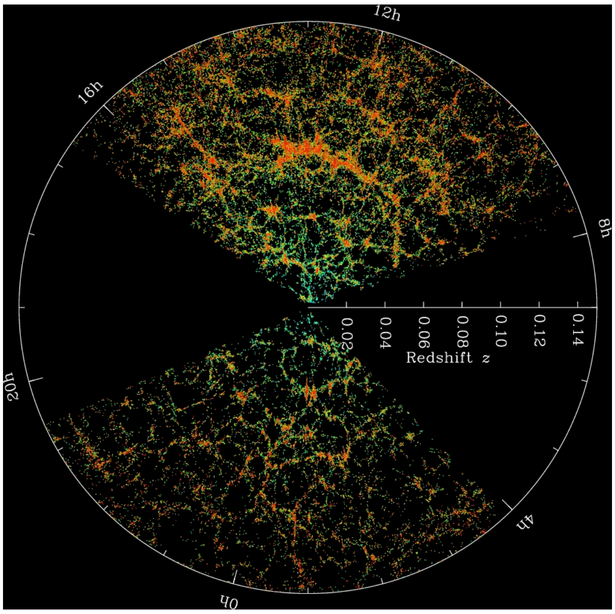

Figura 9.14 – Mapa de redshifts de ~ 1.500.000 galáxias produzido com dados do SDSS DR13. Note-se as estruturas presentes no mapa, em diferentes redshifts. Fonte: http://www.sdss.org/science/.

Os mapas de alta precisão do SDSS de história de expansão cósmica usando BAO têm sido especialmente importantes na quantificação desses resultados, colocando vínculos sobre a geometria e conteúdo energético do universo. BAO foram detectados primeiramente no agrupamento de galáxias pelo SDSS-I e no 2dFGRS e, desde então, também foram detectados no gás de hidrogênio intergaláctico usando medidas de Lyman-alfa.

BAO são uma consequência das flutuações de densidade de matéria no Universo, ocorrendo em uma escala característica de ~ 150 Mpc, chamada de escala acústica, e prevista a partir das medidas das flutuações de temperatura da RCFM, e podem ser usadas como régua padrão para medir a evolução das flutuações de densidade (**Figura 9.15**). O pico acústico observado em BAO permite estimar a distância entre os redshifts z = 0,35 (distribuição da galáxias) e z = 1100 (RCFM) com uma precisão melhor do que 4% (**Figura 9.16**).

Os levantamentos apresentados nas **Figuras 9.17** e **9.18** foram feitos, respectivamente, pelos consórcios 2dFGRS e 6dFGRS, realizados pelo Observatório Anglo-Australiano, com colaboração de várias universidades inglesas e australianas, e o 2MASS, coordenado pela Universidade de Massachussets (EUA) e realizado pelo IPAC, mantido pelo JPL/NASA e pelo CALTECH.

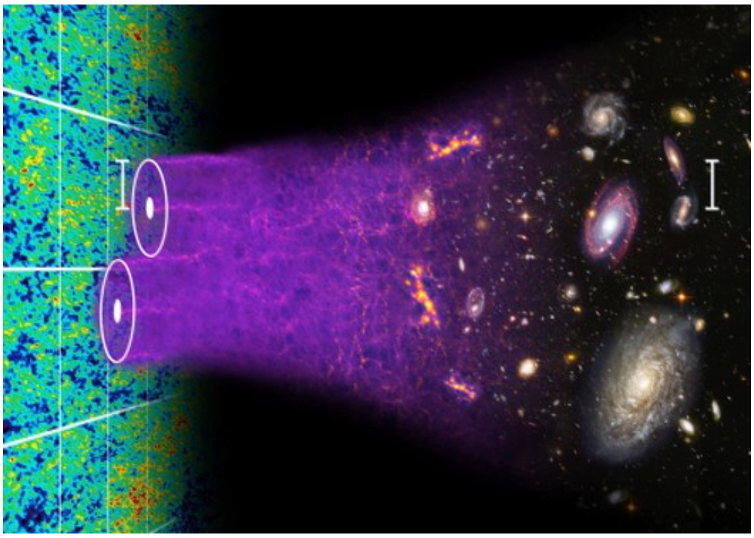

Figura 9.15 – Representação da evolução das estruturas, com a escala característica de BAO, em 150 Mpc, marcada à esquerda. Fonte: http://www.sdss3.org/surveys/boss.php.

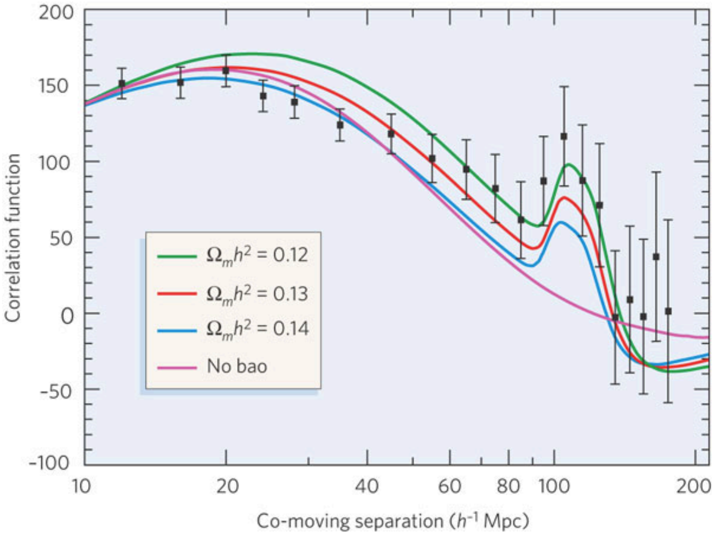

Figura 9.16 - Função de correlação de 2 pontos da distribuição de matéria do Universo, com um pico correspondente aos BAO em ~ 150 Mpc. Note-se a dependência do ajuste dos modelos à existência do pico de oscilação. Fonte: C. Bennett (Nature 2006).

O 2dF Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) utilizou a instalação 2dF (do inglês, campo de 2 graus) construída pelo Observatório Anglo-Australiano. O 2dFGRS obteve espectros para ~ 245.000 objetos, principalmente galáxias, e obteve-se redshifts confiáveis para 221.000 galáxias. As galáxias cobrem uma área de aproximadamente 1500 graus quadrados selecionados do APM Galaxy Survey estendido em três regiões: uma faixa no Polo Norte Galáctico (em inglês, NGP), outra no Polo Sul Galáctico (em inglês, SGP) e campos aleatórios espalhados pela faixa SGP.

A **Figura 9.17** mostra o mapa da distribuição de galáxias produzida com os dados do 2dF ao final do projeto. Alguns dos vários resultados de impacto do 2dF foram: uma

medição precisa do espectro de potência da aglomeração de galáxias em escalas de até 300h-1 Mpc, permitindo determinações precisas da densidade de massa total do universo e da fração de bárions, medidas, em combinação com observações da RCFM, da constante de Hubble e densidade de bárions, evidência de uma constante cosmológica não-zero (energia escura) e restrições na equação de estado da energia escura; as funções de luminosidade para galáxias com diferentes tipos espectrais, tanto no campo como em clusters e a variação nas propriedades de agrupamento de galáxias como funções de luminosidade e tipo espectral.

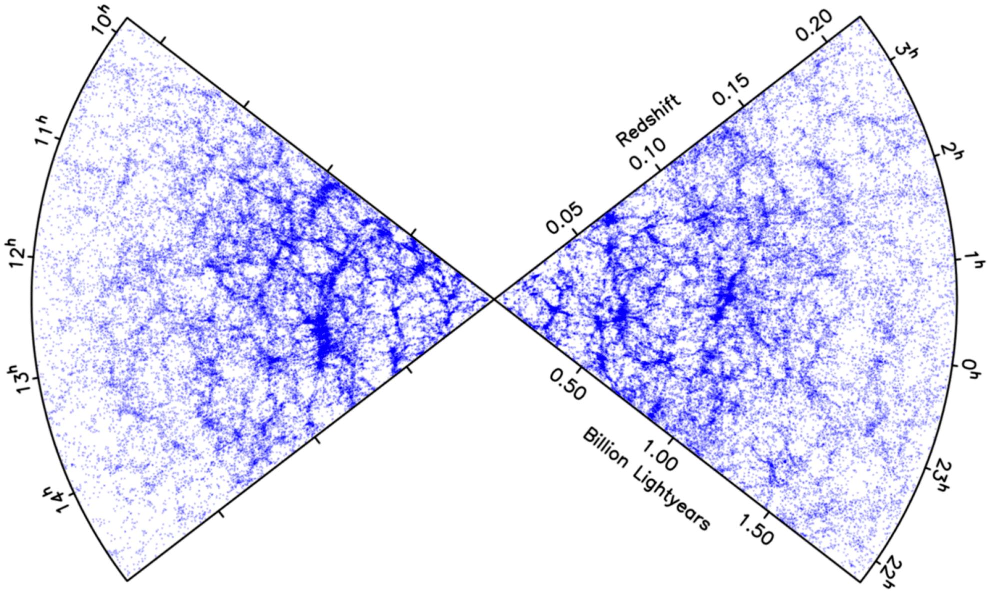

Figura 9.17 – Distribuição das ~ 245.000 galáxias do 2dF. Note-se a presença das estruturas filamentares nos mesmos redshiffts observados nos levantamentos anteriores. Fonte: http://www.roe.ac.uk/~jap/2df/

O 6dF é uma referência para o instrumento de campo de 6 graus, um dispositivo que usa fibras ópticas e tecnologia de posicionamento robótico, aumentando poder de observação do Telescópio Britânico Schmidt do Observatório Anglo-Australiano em mais de 100 vezes sua capacidade original (**Figura 9.18**). Lembramos que o Observatório Anglo-Australiano foi responsável também pelo 2dFGRS. Dezenas de pequenos prismas de vidro do tamanho da ponta de um dedo permitem que o telescópio veja até 150 estrelas ou galáxias ao mesmo tempo - tornando 6dF a máquina final para mapear o universo próximo. O 6dF mapeou quase todo o Hemisfério Sul, observando mais de 100000 galáxias. O resultado final é uma nova maneira de ver a forma como as galáxias se aglomeram e se movem no nosso universo local, e como isso aconteceu.

Os levantamentos anteriores foram todos feitos na faixa óptica do espectro eletromagnético. Já o 2MASS (Two Micron All Sky Survey, **Figura 9.19**) opera na faixa infravermelho e, utilizando novos detectores podem agora detectar objetos astronômicos mais de 100 milhões de vezes mais fracos do que aqueles detectados nos

levantamentos anteriores. Além de fornecer um contexto para a interpretação de resultados obtidos em infravermelho e outros comprimentos de onda, o 2MASS está fornecendo respostas diretas a perguntas imediatas sobre a estrutura em larga escala da Via Láctea e do Universo Local.

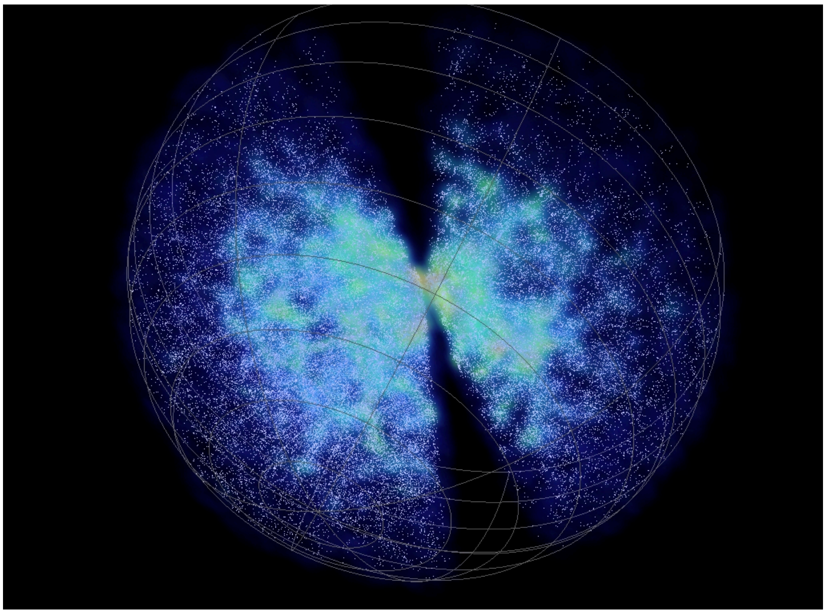

Figura 9.18 – Distribuição das galáxias com z ≤ 1 (~2 milhões de anos luz), no Hemisfério Sul, medidas pelo 6dF Galaxy Redshift Survey. O mapa contém 136.304 galáxias e mostra, claramente, a distribuição de estruturas no Universo próximo e uma rarefação à medida que o *redshift* aumenta, na direção das bordas da esfera. Fonte: http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/.

Figura 9.19 – Foto do levantamento de galáxias 2MASS (2 Micron All Sky Survey) contendo cerca de 1,6 milhões de galáxias em todo o céu. As galáxias mais brilhantes e mais próximas são representadas em azul, e as mais fracas, as mais distantes estão em vermelho. A faixa escura nesta imagem mostra a área do céu onde a nossa Via Láctea galáctica bloqueia a nossa visão de objetos distantes, que, nesta projeção,

situa-se predominantemente ao longo das bordas da imagem. (Fonte: IPAC/Caltech).

O 2MASS digitalizou todo o céu em três bandas de infravermelho próximo para detectar e caracterizar fontes pontuais mais brilhantes do que cerca de 1 mJy em cada banda, com relação sinal / ruído (SNR) maior que 10, utilizando dois telescópios automatizados de 1,3 m, um no Monte Hopkins (Arizona, EUA) e um no CTIO (Cerro Tololo, Chile). O 2MASS Norte começou as operações de rotina em junho de 1997 junho e o 2 MASS Sul, em março de 1998, operando até fevereiro de 2001.

A Universidade de Massachusetts (EUA) foi responsável pelo gerenciamento geral do projeto e pelo desenvolvimento de câmeras infravermelhas e sistemas de computação no local em ambas as instalações. O Centro de Processamento e Análise de Infravermelhos (IPAC) é responsável por todo o processamento de dados através do Pipeline de Produção e construção e distribuição dos produtos de dados. O 2MASS envolve a participação de membros de diversas instituições, tendo sido financiado pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e pela National Science Foundation (NSF).

Os benefícios científicos imediatos da pesquisa 2MASS incluem o primeiro censo fotométrico de galáxias mais brilhante do que 13,5 magnitudes. O catálogo de mais de 1.000.000 de galáxias fornecerá medições fotométricas em três comprimentos de onda e alguns parâmetros estruturais para grandes amostras de galáxias em diferentes ambientes, e permitirá procurar objetos raros, frios e extremamente vermelhos (por exemplo, estrelas de luminosidade extremamente baixa e anãs marrons) ou muito obscurecidos em comprimentos de onda ópticos (por exemplo, AGNs e aglomerados globulares obscurecidos por poeira Localizado no plano Galáctico).

9.5 O SETOR ESCURO

9.5.1 MATÉRIA ESCURA

Na década de 80, os astrônomos observaram um fato bastante estranho ao estudar as curva de rotação das galáxias espirais. A **Figura 9.20** mostra a curva de velocidade de rotação devida ao disco, gás e halo da nossa Galáxia, em azul, e a curva teórica, prevista pelas Leis de Kepler. Devido à grande diferença observada entre a curva da galáxia e a curva do disco, foi levantada a hipótese que o halo continha muito mais matéria do que o imaginado e que essa matéria somente sofria a ação da gravidade, não emitindo nenhum tipo de radiação eletromagnética. Daí o nome “MATÉRIA ESCURA”.

Podemos mostrar a curva de rotação de uma galáxia espiral deve variar em função da posição do elemento de massa com a distância até o centro. A relação entre a energia

potencial gravitacional e a energia cinética de um elemento de matéria a uma distância r do centro da Galáxia, de acordo com a 2ª lei de Newton, é dada por:

$$G\frac{Mm}{r^2} = m\frac{V^2}{r}$$

determinando, a partir daí, uma relação para a massa contida dentro de uma esfera de raio R:

$$M = \frac{rV^2}{G}$$

o que sugere que, a velocidade deve aumentar proporcionalmente à massa e, fora dos limites do objeto, cair rapidamente a zero. A **Figura 9.20** nos mostra algo completamente diferente. A curva combinada com toda a massa da Galáxia (azul) deveria cair como a curva do disco, caso a matéria do halo fosse desprezível em relação à massa do disco, que é o que se supõe para gerar a curva vermelha.

Figura 9.20 – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia, uma espiral. A curva azul é a combinação das curvas de disco, gás e halo e esperava-se que ela decrescesse para raios maiores que 20 ou 30 kpc, conforme a curva vermelha, de acordo com as leis de Newton (Fonte: http://astro.if.ufrgs.br).

Entretanto, nota-se claramente que a velocidade do halo também cresce e, para raios maiores que os raios determinados por meio de observações ópticas, tende à velocidade de toda a Galáxia, conforme vemos na **Figura 9.21**. As estimativas dinâmicas (via leis de Newton) dessa matéria não-luminosa (“escura”) indicam que ela é quase 10 vezes maior que a quantidade de matéria bariônica, como pode ser visto na Tabela 9.1.

Sabemos que também existe matéria escura bariônica em anãs negras, nuvens moleculares frias (“escuras”) e outros objetos que não emitem luz visível. A resposta é que sempre será possível tentar medir esses objetos feitos de bárions por meio da

emissão infravermelho ou rádio. Quanto à matéria não-bariônica, ela somente pode ser percebida através de efeitos da gravidade; pois não emite radiação eletromagnética. Para ela existem diversos candidatos, entre eles o neutrino, que é o mais conhecido. A matéria escura é responsável por cerca de 23% de toda a densidade do Universo e concluímos então que, mesmo falando somente de matéria, somos constituídos de matéria que é a exceção do que existe no Universo. Em outras palavras, praticamente desconhecemos de que tipo de matéria o Universo é feito...

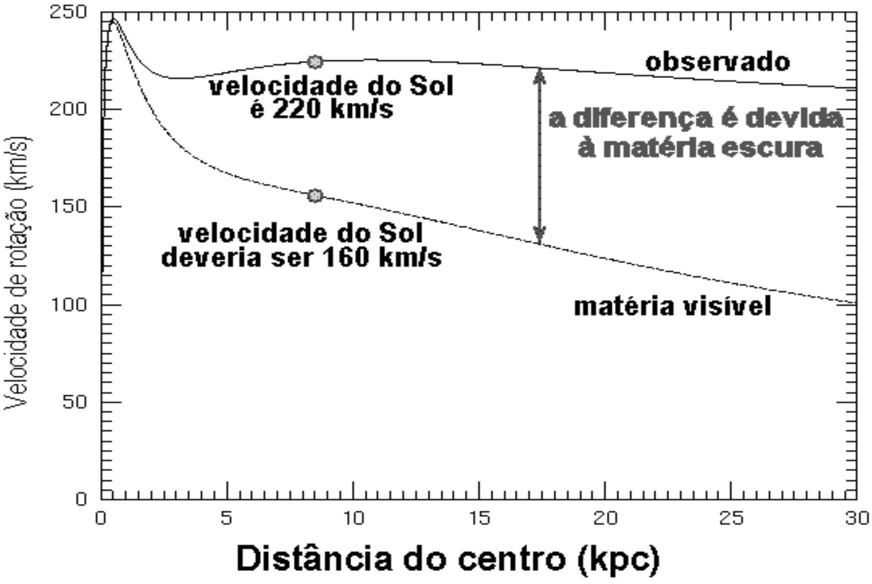

Figura 9.21 – Curva de velocidade radial da nossa Galáxia espiral. Acredita-se que a diferença entre as curvas é causada pela presença de matéria escura (Fonte: http://astro.if.ufrgs.br).

9.5.2 ENERGIA ESCURA

A energia escura é uma grandeza ainda mais complicada de definir, porque simplesmente não sabemos o que ela é ou como medi-la. Pode-se dar a ela diversos significados, todos mais ou menos relacionados com um termo conhecido como Constante Cosmológica, colocado por Einstein nas equações da Relatividade Geral para garantir que suas equações descreviam um Universo real. Naquela época supunha-se que o Universo continha somente matéria comum e radiação e, devido ao tamanho estimado, a contribuição da matéria para a densidade total era muito maior do que a da radiação. Daí a ideia de que vivíamos num Universo não-relativístico e sem pressão. A constante introduzida por Einstein contrabalançaria a atração gravitacional exercida pela matéria não-relativística e garantia que o Universo não se contrairia, mantendo a situação estática.

Entretanto, a introdução de uma constante para balancear as observações da época era algo que desagradava bastante Einstein, devido à "quebra da beleza formal da teoria".

Além disso, uma constante para garantir o equilíbrio nas condições em que foi introduzida criava um equilíbrio instável no Universo modelado pelas equações de Einstein. Como a constante não dependia de nenhuma partícula, caso houvesse um pequeno desequilíbrio e o Universo ficasse ligeiramente maior, ela superaria a densidade de matéria, uma vez que esta depende do volume (que aumentaria um pouco). Esse processo se alimentaria e haveria uma expansão acelerada. Caso contrário, seguindo o mesmo raciocínio de a densidade de matéria aumentar com o decréscimo do volume, o Universo seguiria rapidamente para um colapso.

Porém, em 1929, Hubble mostrou que o Universo estava em expansão e Einstein pode descartar a Constante Cosmológica. Ela voltou à moda algumas vezes durante o séc XX, para reconciliar problemas relativos à idade do Universo e reapareceu em grande estilo no final do séc. XX, quando os grupos de Saul Perlmutter e colaboradores (Supernova Cosmology Project) e de A. Riess e colaboradores (High-z Supernova Search Team), estudando supernovas tipo I, localizadas a centenas de milhões de anos-luz da Terra, independentemente encontraram resultados que só poderiam ser explicados supondo-se que o Universo estava sofrendo um processo de aceleração. A importância do resultado obtido por ambos os grupos e sua relevância para a Cosmologia resultou no Prêmio Nobel de Física de 2011.

A **Figura 9.22** mostra os resultados de ambos os grupos, comparando o fluxo (ou diferença de magnitudes m-M) em função da distância (z). Caso o Universo não sofresse aceleração, esse fluxo deveria decrescer proporcionalmente ao quadrado da distância. Para um dado valor de z, um universo acelerado fornece magnitudes com fluxos menores (distâncias reais maiores) do que um universo desacelerado. Ao olhar os dados utilizados para produzir a **Figura 9.22**, ambos os grupos concluíram que a aceleração explicava o fato que as supernovas observadas em *redshift* $z \sim 0{,}5$ eram, em média, 0,25 magnitudes mais fracas do que deveriam ser, caso o Universo não estivesse se expandindo de forma acelerada.

Uma questão que sempre perturbou os físicos desde que a existência de Λ foi proposta é o sentido físico que ela deveria ter. Em outras palavras, que componente do Universo poderia manter a densidade de energia constante durante a expansão (ou contração)? A resposta mais aceita atualmente – não necessariamente a única – é que a energia do vácuo pode representar esse papel. Essa energia vem de uma consideração quântica, ligada ao princípio da incerteza de Heisenberg, que permite que um par de partícula e antipartícula possa ser criado do vácuo. Esse processo de criação ou aniquilação não depende da expansão ou contração do Universo.

O principal problema com essa associação é que, se calcularmos a densidade de energia do vácuo a partir de considerações de mecânica quântica, temos um problema sério: essa energia é da ordem de 10^{133} eV/m^3. Isso é **124 ordens de magnitude maior** do que

a densidade crítica do Universo e representa uma discrepância absurda entre teoria e observação. Ainda não sabemos quase nada sobre a energia do vácuo e esta é uma área em que astrônomos podem ajudar bastante os físicos de partículas, pois estudando o Universo nas maiores escalas conhecidas, estamos indiretamente examinando a estrutura do vácuo em escalas muito pequenas. O estudo da Energia Escura, sua origem e propriedades é um dos tópicos mais ativos e interessantes na Cosmologia hoje.

Figura 9.22 – Diagrama de fluxo (m-M) x distância para supernovas tipo I observadas pelos grupos de Perlmutter e Riess. O painel inferior mostra a diferença entre os dados e as previsões de modelo com Λ=0 e Ω_M= 0,3. Fonte: http://www.cfa.harvard.edu/oir/Research/supernova/HighZ.html.

9.6 O UNIVERSO HOJE

A combinação dos resultados observacionais discutidos nas seções anteriores constituem hoje o conjunto de informações mais detalhado e importante para estudar a origem e a evolução do Universo. As medidas da RCFM, da distribuição de supernovas tipo I distantes, de BAO, dos objetos distantes com linhas Lyman alfa e os levantamentos de *redshifts*, combinados, mostram um quadro bastante completo das propriedades do Universo. Medidas separadas fornecem intervalos de valores maiores

para os parâmetros cosmológicos, enquanto a combinação de duas ou mais estreitam os intervalos de possibilidades.

A **Tabela 9.1** apresenta os valores dos principais parâmetros cosmológicos, obtidos a partir de uma análise combinada entre os resultados mencionados e os principais componentes da densidade de matéria e energia estão representados na **Figura 9.23**. Isso nos permite concluir, conforme mencionado na Seção 9.6, que a combinação da matéria ordinária, Matéria Escura e Energia Escura indicam uma geometria Euclidiana para o Universo e que 96% de sua composição, constituída pela Matéria Escura e pela Energia Escura, é desconhecida.

TABELA 9.1 – VALORES DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS COSMOLÓGICOS (FONTE: ADE ET AL., PLANCK COLLABORATION 2016)

Parâmetro cosmológico	Valor (a)	Valor (b)
Densidade total Ω_t	1,02±0,02	1,02±0,02
Densidade de bárions Ω_b	0,0484±0,0002	0,0483±0,0002
Densidade de matéria escura Ω_{CDM}	0,258±0,002	0,257±0,001
Densidade de matéria escura Ω_M	0,308±0,012	0,306±0,007
Densidade de energia escura Ω_Λ	0,692±0,012	0,694±0,007
Constante de Hubble H_0 (km/s.Mpc)	67,800±0,009	67,900±0,006
Índice espectral das flutuações n_s	0,968±0,006	0,968±0,004
Profundidade óptica na recombinação	0,066±0,016	0,067±0,013
Sigma 8	0,815±0,009	0,815±0,009
Redshift da reionização z_{rei}	8,8±1,6	8,8±1,6
Idade do Universo t_0 ($x10^9$ anos)	13,80±0,02	13,80±0,02
Época do desacoplamento t_{dec} ($x10^3$ anos)	377,7 ± 3,2	377,7 ± 3,2
Redshift do desacoplamento z_{dec}	1090,09±0,42	1090,09±0,42
Temperatura da RCFM (K)	2,726±0,001	2,726±0,001

(a) Somente usando dados do satélite Planck; (b) Planck + medidas do parâmetro de Hubble, de BAO e de supernovas tipo I.

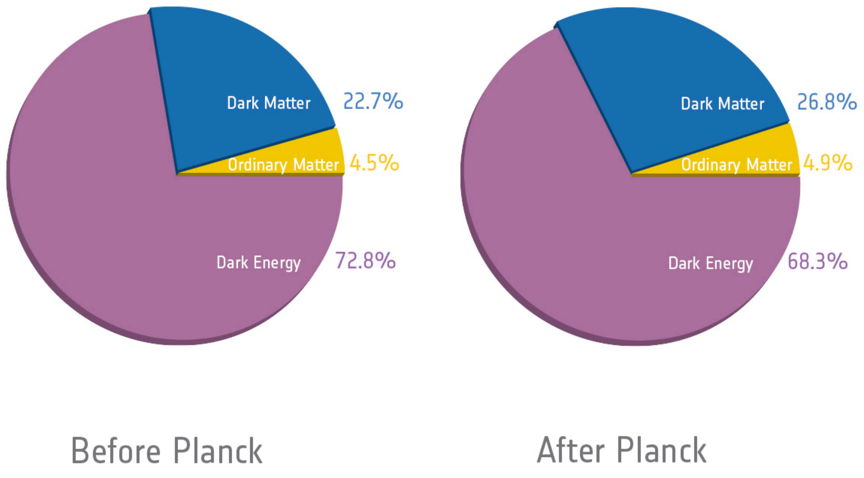

Figura 9.23– Distribuição percentual dos componentes de matéria e energia no Universo.

Com relação ao mecanismo de expansão, devido à presença da energia escura, sabemos que o Universo, apesar de plano e com densidade de matéria menor que a densidade crítica, possui uma densidade de energia que, além de complementar o balanço de densidades para garantir um Universo plano, ainda é responsável pela aceleração do processo de expansão. Assim, em termos dinâmicos, podemos dizer que o Universo atual é plano e, ao invés de ter a expansão gradualmente freada pela gravidade da matéria existente, a expansão é dominada pela presença da energia escura, causando uma aceleração da expansão.

9.6.1 A GEOMETRIA E EVOLUÇÃO DO UNIVERSO

A questão do futuro do Universo está ligada, diretamente, à quantidade de matéria que o Universo possui. A combinação da matéria comum (prótons, nêutrons, elétrons e neutrinos), matéria e energia escura determina não só a dinâmica do Universo (expansão retardada ou acelerada), mas também a geometria (casos em que ele é aberto, fechado ou plano). A combinação de matéria ordinária, matéria escura e energia escura definem a geometria do Universo e, consequentemente, o destino do Universo.

Igualando-se as energias cinética e potencial do Universo, considerando que a velocidade da expansão é dada pela Lei de Hubble e considerando a densidade de matéria e energia do Universo, podemos escrever:

$$\Omega_{crit} = \frac{8\pi G\rho}{3H_0^2} \approx 10^{-29} g.cm^{-3}$$

em que G é a constante de gravitação, ρ é a densidade de matéria-radiação do Universo, H_0 é a constante de Hubble e $\Omega_{crít}$ é a densidade crítica do Universo. Se a densidade for baixa, o Universo seguirá eternamente no processo de expansão em que se encontra atualmente. Entretanto, se a densidade for maior do que a densidade crítica, a força da gravidade tem intensidade suficiente para reverter esse processo de expansão, fazendo com que o Universo, eventualmente, termine em uma grande contração

Já o destino do Universo é determinado pela sua densidade, geometria e taxa de expansão. Resultados dos satélites COBE, WMAP e Planck, bem como de observações de aglomerados de galáxias nos levantamentos descritos na seção 9.3.2, sugerem que o Universo é plano, ou seja, que a geometria que descreve as grandes escalas é a chamada geometria "Euclidiana", nossa velha conhecida. Densidades diferentes definem geometrias esféricas ou hiperbólicas.

Na ausência de uma constante cosmológica ou termo equivalente, nas equações de Friedmann, podemos dizer que a densidade define a geometria e, por conseguinte, o destino do Universo. Finalmente, diversas observações indicam que a constituição do

Universo é praticamente desconhecida, com propriedades bastante estranhas. Na verdade, a composição química de cerca de 96% do Universo é desconhecida. Dividimos essa parte desconhecida entre matéria e energia escuras e, para conhecer o destino do Universo – e, em consequência, também o nosso – é necessário determinar o que são esses componentes e como eles influenciam na dinâmica do Universo.

Uma das formas de identificação dessa geometria é simplesmente olhar os ângulos dos triângulos representados sobre as superfícies: geometrias fechadas ou esféricas têm a soma maior que 180°; geometrias abertas ou hiperbólicas tem a soma menor que 180° enquanto a plana, ou Euclidiana, é a que normalmente nos lembramos, em que a soma é igual a 180° (**Figura 9.24**).

Figura 9.24 – Comparação das diferentes geometrias no Universo (aberta, plana e fechada) e seu efeito na distribuição angular de temperaturas da RCFM.

A geometria define a dinâmica do Universo. Essa força depende da densidade média de matéria-energia no Universo. A densidade de matéria atual do Universo não é suficiente para interromper a expansão (= 0,23 Ω_0) e, pensando somente em termos de matéria, a geometria seria aberta e o Universo se expandiria para sempre. Entretanto, a densidade de energia escura, que funciona como uma pressão negativa e é responsável pela

expansão acelerada do Universo, contribui para a densidade total, fazendo com que $\Omega_0=\Omega_T/\Omega_{crit}=1$.

Se a densidade total fosse maior que a densidade crítica, ρ_c, a expansão seria interrompida e o movimento se inverteria, conduzindo o Universo a um colapso, ou *Big Crunch*. Para valores menores que ρ_c a expansão aconteceria eternamente. Conforme foi discutido anteriormente, toda a matéria que forma a nossa galáxia, outras galáxias e aglomerados pode ser estimada por meios dinâmicos, isto é, aplicando-se as leis de Newton e as leis de conservação de energia. Essa relação entre a energia cinética (que quantifica o movimento das galáxias) e a energia gravitacional (que “atrapalha” o movimento, tendendo a puxar as galáxias umas ao encontro das outras) é chamada de teorema do Virial. Por estudos dos resultados da aplicação do teorema do Virial, chegamos à conclusão que a quantidade de matéria escura no Universo é cerca de 7 – 8 vezes maior do que a quantidade de matéria normal.

9.6.2 O FUTURO DO UNIVERSO

Ao longo desse texto ressaltamos um fato notável: toda a dinâmica da evolução do Universo obedece a um delicado equilíbrio de forças, uma espécie de *“cabo de guerra”* entre a força da gravidade e diversas outras forças que, em diferentes épocas da vida de um sistema planetário, de uma estrela ou de um aglomerado de galáxias, atuam contrabalançando a tendência da gravidade de atrair os corpos. Então, se imaginarmos que o Universo não tem matéria suficiente para interromper completamente o processo de expansão, o que vai acontecer com o passar do tempo?

Sabemos que estrelas se formam de nuvens de Hidrogênio, de modo que, daqui a muitos bilhões de anos, teremos a seguinte situação: todo o Hidrogênio disponível para virar estrela terá sido consumido nas reações nucleares e os átomos que não foram consumidos então não terão mais como se agrupar para formar estrelas, porque a expansão terá separado as nuvens que são, naturalmente, o local onde acontece formação de estrelas. E as galáxias? Nas galáxias de campo, que se encontram sozinhas, as estrelas mais velhas já terão queimado todo o seu combustível e a galáxia apagará, porque não haverá mais formação estelar. As galáxias que se encontram em grupos e aglomerados, provavelmente entrarão em estado de equilíbrio gravitacional ou então se fundirão em um só objeto. O que acontece com as estrelas das galáxias de campo também acontecerá com as galáxias em grupos: elas “apagarão”.

Juntando a isso as consequências da Segunda Lei da Termodinâmica, que diz que, sempre que acontece um evento irreversível no Universo, a entropia (que pode ser comparada ao grau de desorganização de um determinado sistema) permanece constante ou aumenta, caminhamos então para um estado em que não haverá mais energia

disponível no Universo para que aconteçam eventos quaisquer. Além disso, após cerca de 10^{32} anos os constituintes básicos da matéria, feitas principalmente de prótons, devem decair, aumentando o campo de radiação e "decompondo" toda a matéria existente no Universo.

O Universo estará, então, no seu estado de energia mínima – onde não há como perturbá-los sem que mais energia seja introduzida – e de entropia máxima, caminhando para seus momentos finais. Se não houver nenhum processo inesperado que modifique esse quadro (e que nem podemos imaginar direito qual seja), estaremos presenciando a morte térmica do Universo. Essa é uma das consequências naturais de um modelo de Universo que começa com um Big Bang e cuja quantidade de matéria não é suficiente para interromper o processo de expansão.

Por outro lado, caso a densidade fosse maior do que ρ_c, e supondo que vivemos num Universo que começou com uma grande explosão, teríamos um instante (não sabemos exatamente quando) em que a expansão do Universo seria interrompida e ele começaria a se contrair. A gravidade puxaria então os corpos novamente uns de encontro aos outros e, seguindo as leis da Termodinâmica, a temperatura do Universo novamente aumentaria. Com a diminuição do volume e aumento gradual da densidade, teríamos uma contração acelerada e o final desse processo seria um *Big Crunch*, com o Universo voltando a uma singularidade e levando consigo todo o espaço-tempo. O quadro atual das observações praticamente descarta essa possibilidade, mas modelos cíclicos e estacionários ainda são estudados e tem um atrativo teórico interessante, que é justificar o processo de criação contínua de matéria.

Ainda não sabemos responder se o quadro que descreve a morte térmica do Universo acontecerá exatamente desse modo. As questões formuladas pelos cientistas que trabalham com a física de partículas se juntam às dos cosmólogos nessa tentativa de definir qual será o futuro do Universo que hoje observamos. Para terminar de montar o quadro, as respostas procuradas pela Cosmologia são cruciais, pois os valores precisos da taxa de expansão do Universo, sua idade e composição são essenciais para entender o quebra cabeças cosmológico.

9.7 CONCLUSÃO

A Cosmologia é uma ciência que trabalha para tentar entender o conteúdo, estrutura e evolução do Universo, lidando com enormes tempos e distâncias. Ela tenta também entender como o Universo jovem se comportou sob condições extremas de densidade, temperatura e energia. Teóricos, observadores e experimentalistas estão desenvolvendo uma grande variedade de técnicas e instrumentos para responder as questões fundamentais que levantamos ao longo desse capítulo. O progresso ao longo dos

últimos 30 anos foi enorme, mas na década de 90, em particular, a Cosmologia tornou-se o que chamamos de ciência madura, dispondo de uma enorme quantidade de dados, informações diversas e teoria e instrumentação avançando rapidamente.

Observações recentes dos satélites WMAP e Planck, de outros experimentos que vem medindo a RCFM e resultados dos levantamentos de galáxias mencionados na seção 9.3.2 responderam algumas das questões sobre a história térmica e a evolução do Universo. Observações das estruturas em grande escala vêm sendo feitas por diversos grupos no mundo, usando dados de telescópios no solo e a bordo de satélites (Telescópio Hubble). Nosso conhecimento sobre a distribuição e movimento peculiar (causado pela distribuição de massa no Universo) das galáxias ainda é incompleto, mas já temos uma boa ideia sobre a dinâmica do Universo que nos cerca e de suas propriedades físicas mais importantes. Uma nova geração de experimentos (telescópios gigantes, satélites e experimentos cuja tecnologia teve que ser desenvolvida especialmente para eles) estão fazendo ou farão novas medidas e estudar o Universo de formas inimagináveis há 40 anos atrás. Estimativas da idade do Universo e da quantidade de matéria escura estão em andamento, com o Telescópio Espacial Hubble, diversos levantamentos de objetos em diferentes comprimentos de onda (2MASS, 2dF, 6dF SDSS, SNI, objetos Lyman-α, etc.). Vários experimentos estão em andamento para identificar candidatos à matéria escura, como os experimentos de neutrinos e WIMPS (Weak Interactive Massive Particles) KamLand, Edelweiss, Sudbury. O INPE participa ativamente de vários desses projetos, tanto para estudar a RCFM quanto no estudo de simulações de interação de galáxias. Estamos assistindo a um enorme avanço no entendimento da evolução das galáxias e das estruturas em grande escala nesta década. Ainda não sabemos exatamente qual é a natureza da matéria escura ou da energia escura, mas certamente ambas são resultado de processos que ocorreram no Universo jovem.

Os problemas principais que a Cosmologia tenta resolver são bem formulados, mas muitas das soluções têm permanecido obscuras por décadas. Finalmente, com o aumento da quantidade de informações obtidas a partir do avanço dos experimentos, computadores e o consequente avanço da teoria, parte das questões fundamentais aqui apresentadas começam a ser resolvidas. Vários dos pesquisadores da DAS estão diretamente envolvidos nessa corrida ao conhecimento e estão trabalhando atentos aos novos resultados que, diariamente, aparecem na literatura científica.

A primeira versão dessa monografia, escrita em 1998, continha diversas informações conflitantes com o conteúdo atual e algumas questões formuladas nas décadas de 80 e 90 que foram respondidas recentemente pelos resultados do satélite WMAP (2003 e 2006) e pelos levantamentos de objetos distantes (diversos resultados em 2004, 2005 e 2006).

A segunda versão, escrita em 2006, apresentou diversas atualizações de resultados e algumas novidades nas estimativas de parâmetros cosmológicos, mas ainda não conteve resultados significativamente diferentes da versão de 1998. As questões em aberto sobre a polarização tensorial da RCFM, uma explicação teoricamente bem fundamentada e comprovada observacionalmente sobre a origem da Energia Escura e a identificação definitiva do(s) constituinte(s) da Matéria Escura ainda aguardam respostas nessa versão de 2017.

Se uma monografia sobre esse mesmo tema for escrita daqui a 10 anos, temos certeza que ela será ainda mais distinta das que foram escritas em 1998 e 2006, no que diz respeito aos problemas fundamentais que a Cosmologia pretende resolver.

9.8 REFERÊNCIAS

Além da bibliografia em português e inglês consultada, incluo alguns outros textos que talvez despertem a atenção daqueles que tiveram uma formação em ciências exatas. Eles foram escolhidos com base pura e simplesmente no meu gosto pessoal, estando ordenadas por ordem crescente de dificuldade.

- "O despertar da Via Láctea". **Thimothy Ferris**. Ed. Campus, 1990. Texto de divulgação, um pouco romanceado, mas que cobre de forma bastante fiel a história da astronomia, desde seus primórdios. O autor é um dos grandes jornalistas ligados à divulgação científica nos EUA.

- "A Brief History of Time**". Stephen Hawking**. Um dos livros mais divulgados sobre Cosmologia, lamentavelmente muito mal traduzido para o português, sob o título "Uma breve história do tempo". Texto muito interessante, por mostrar a visão de Universo de um dos grandes físicos da segunda metade do século XX.

- "Shadows of Creation: Dark Matter and the Structure of the Universe". **Michael Riordan e David Schramm**. W. H. Freeman and Co., New York, 1991. Texto de divulgação científica, de um dos especialistas em nucleossíntese primordial, busca transmitir os conceitos básicos do processo de formação de estruturas e da existência de matéria escura no Universo.

- "A radiação cósmica de fundo e a formação de estrutura em larga escala no Universo: uma visão atual". **Carlos Alexandre Wuensche**. Revista *Humanidades*, **38**:142-151, 1994. Ensaio sobre o problema da formação de estruturas no Universo, escrito para uma revista basicamente voltada para um público de ciências humanas.

- "Os Três Primeiros Minutos". **Steven Weinberg**. Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980. Escrito por um físico de partículas que se aventurou no terreno da Cosmologia, esse texto apresenta, numa linguagem clara e simples, um resumo do Universo primordial. Um dos primeiros textos de divulgação escrito sobre Cosmologia (1977), com um apêndice matemático relativamente simples...

- "O Big Bang". **Joseph Silk**. Editora UnB, 2a. ed., 1989. Um dos papas da área, Joseph Silk apresenta o modelo do Big Bang de forma simples, e introduz alguns conceitos matemáticos, também concentrados em um apêndice, um pouco mais complexos que os apresentados no livro de Weinberg.

- "Foundations of Astronomy". **Michael Seeds**. Wadsworth Publising Co., 1997. Livro texto de introdução à astronomia, com textos claros e excelentes ilustrações.

- "O Universo inflacionário". **Alan Guth**. Editora Campus, 1997. Texto excelente escrito por um dos criadores do modelo inflacionário.

- “O passado e o presente do Cosmos”. Scientific American Brasil, Ed. Especial, no. 1, Setembro 2003.
- “O que é Cosmologia”. **Mario Novello**. Editora Zahar, 2006

Os artigos abaixo são mais técnicos, escritos em inglês, mas com uma excelente quantidade de informação atualizada.

- “Connecting Quarks to Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century”. Committee on the Physics of the Universe, National Research Council. National Academic Press, 2003.
- “Beyond ΛCDM: Problems, solutions, and the road ahead”. Philip Bull et al. ArXiv:1512.05356v2 (2015).
- Challenges in Cosmology from the Big Bang to Dark Energy, Dark Matter and Galaxy Formation”. Joseph Silk. ArXiv:1611.09846v2 (2016).
- “The Cosmological Parameters”. O. Lahav e A. Liddle, Review of Particle Physics (2016).

Capítulo 10

ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS*

Odylio Denys Aguiar**

*Primeira versão Maio/2018.

** e-mail: odylio.aguiar@inpe.br

Credit: NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet

ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS

LISTA DE FIGURAS 10-4

LISTA DE TABELAS 10-5

10.1 O QUE SÃO ONDAS GRAVITACIONAIS? 10-6

10.2 COMO PODEMOS DETECTAR/OBSERVAR ONDAS GRAVITACIONAIS? 10-8

10.2.1 PROVA DE QUE ELAS EXISTIAM 10-11

10.2.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO E DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS 10-13

10.3 FONTES ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS 10-18

10.4 A ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS FOI INAUGURADA! 10-19

10.5 O QUE APRENDEMOS COM AS PRIMEIRAS ONDAS GRAVITACIONAIS OBSERVADAS? 10-22

10.6 QUAL O FUTURO DA ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS? 10-27

10.7 BIBLIOGRAFIA 10-30

LISTA DE FIGURAS

Figura 10.1 - Na teoria da Relatividade Geral de Einstein, as massas, principalmente as grandes, causariam deformação no espaço-tempo, de forma semelhante à deformação causada por uma bola de boliche em um colchão de borracha....................10-8

Figura 10.2 - Deformação de um círculo devido a forças induzidas por ondas h+ ou h× puras 10-9

Figura 10.3 - Ondas gravitacionais de GW150914 10-20

LISTA DE TABELAS

TABELA 10.1 - PARÂMETROS DOS EVENTOS ENVOLVENDO PARES DE BURACOS NEGROS (A-L É ANOS-LUZ)..10-22

TABELA 10.2 - PARÂMETROS DO EVENTO GW170817 (A-L É ANOS-LUZ)..................10-24

10.1 O QUE SÃO ONDAS GRAVITACIONAIS?

O conceito de ondas gravitacionais só pode ser entendido à luz da teoria da relatividade geral de Albert Einstein. Sem ela não podemos entender o que são ondas gravitacionais. Mas vamos explicar isto melhor mais adiante.

Comecemos com a teoria da gravitação de Isaac Newton, publicada no livro "Principia" em 1687. Para Newton a gravidade era uma força invisível que agia à distância, proporcional ao produto das duas massas, que se atraíam, e ao inverso do quadrado da distância entre elas. Esta lei da gravitação, como ficou conhecida, não dizia nada sobre a velocidade de propagação da força gravitacional. Aliás, este foi um assunto de debate por mais de dois séculos: qual seria a velocidade de propagação da força da gravidade? O próprio Newton não tinha certeza da resposta.

Hoje muitos cientistas interpretam que a lei da gravitação de Newton implicava que a velocidade de propagação da força da gravidade era infinita e, portanto, segundo esta lei, se uma massa mudasse a sua posição todo o Universo receberia esta informação instantaneamente. Porém, isto não parece correto. Se no lugar de conhecermos todas as equações de Maxwell, conhecêssemos apenas a lei de Coulomb para as cargas elétricas, também seríamos levados a pensar, erroneamente, que a força elétrica se propagava instantaneamente. A lei da gravitação é para a gravitação o mesmo que a lei de Coulomb para o eletromagnetismo, um pedaço do todo, não a teoria completa. De posse de todas as equações de Maxwell, podemos provar que as ondas eletromagnéticas existem e elas, assim como a força elétrica e a força magnética, se propagam com a velocidade da luz. Também podemos provar o mesmo para a gravitação, mas para isto foi necessária uma teoria mais completa que a teoria de Newton, foi preciso a teoria da relatividade geral de Einstein.

Einstein foi o primeiro cientista a perceber que nenhuma informação poderia viajar à velocidade maior que a da luz. Ele percebeu isto já na sua teoria da relatividade especial, publicada em 1905. Como consequência deste limite de velocidade para todas as coisas, Einstein percebeu também que o espaço não era independente do tempo, mas formava com ele uma entidade que ele chamou de espaço-tempo. Por que ele concluiu isto? Muito simples. Imagine que você está viajando em um foguete com velocidade

próxima da velocidade da luz e que um colega ou uma colega sua esteja em outro foguete também com velocidade próxima da velocidade da luz, porém em direção oposta, se aproximando de você. Segunda a teoria da relatividade especial, a velocidade relativa entre os dois foguetes é a velocidade da luz, e não duas vezes a velocidade da luz. Ora, para conciliar esta mágica matemática o espaço precisa estar ligado ao tempo e vice-versa. Quanto maior a velocidade do referencial, mais o espaço se contrai e o tempo se dilata. Se você tivesse um irmão ou irmã gêmea e viajasse naquele foguete por muito tempo, quando voltasse à Terra, o seu irmão ou irmã, já estariam velhinhos e você não teria envelhecido quase nada. Este efeito é real, o sistema GPS para funcionar direito vive corrigindo os tempos dos satélites em relação ao tempo na Terra, porque os satélites estão com velocidades maiores. Mas o mais surpreendente Einstein ainda estava por descobrir.

Se você acha que a velocidade da luz ser a velocidade limite para todas as coisas ou que o tempo estar ligado ao espaço são conceitos estranhos e difíceis de acreditar, você nem imagina o que Einstein descobriu 10 anos depois, com a sua teoria da relatividade geral, publicada em 1915. Ele descobriu que quando o espaço-tempo se curvava (entortava), ele produzia o efeito gravitacional, ou seja, ele descobriu a origem da gravitação. Dessa forma, os corpos com massa não se atraíam por causa de uma força invisível, mas sim porque eles sentiam o espaço-tempo em volta deles curvo e, portanto, “escorregavam” um em direção ao outro. É como você imaginar uma bola de boliche em cima de um colchão de borracha (FIGURA 10.1). O peso dela deforma o colchão, de maneira que as bolas menores (de bilhar) sentem esta deformação e “escorregam” em direção à bola de boliche.

Agora para explicar as ondas gravitacionais fica fácil. Imagine duas estrelas orbitando uma em torno da outra. Cada uma delas deforma o espaço-tempo em volta dela, mas como elas estão em órbita, uma em torno da outra, elas carregam estas deformações com elas. Neste momento acontece uma coisa diferente. Se as deformações ficassem paradas, nada aconteceria, mas estando em movimento elas se propagam para fora, da mesma forma que não conseguimos evitar que as ondas produzidas pela queda de uma pedra na superfície de um lago se propaguem em todas as direções, para fora do ponto da queda. Einstein batizou estas deformações se propagando para fora dos corpos em órbita, que as produziram, de ondas gravitacionais. Ele descobriu isto em 1916, a partir

das equações da sua teoria da relatividade geral. Também a partir destas equações, ele provou que estas ondas se propagam também à velocidade da luz.

Figura 10.1: Na teoria da Relatividade Geral de Einstein, as massas, principalmente as grandes, causariam deformação no espaço-tempo, de forma semelhante à deformação causada por uma bola de boliche em um colchão de borracha.

Alguns cientistas, como Oliver Heaviside, Lorentz e Poincaré, depois da confirmação por Hertz da existência das ondas eletromagnéticas, já haviam suspeitado e, em alguns casos afirmado, que a velocidade da força da gravidade era a mesma que a da luz, mas foi Einstein que conseguiu provar matematicamente que isto era verdade.

10.2 COMO PODEMOS DETECTAR/OBSERVAR ONDAS GRAVITACIONAIS?

Em 1918, Einstein descobriu, a partir da sua teoria da relatividade geral, que as ondas gravitacionais são produzidas quando existe uma variação do momento de quadrupolo de massa de um objeto ou sistema e que, por causa disto, devem apresentar duas polarizações fundamentais lineares, chamadas de polarizações mais (+) e cruzada (×), a partir das quais todas as outras polarizações podem ser obtidas. Polarização em uma

onda gravitacional é mais ou menos a forma como ela oscila no espaço. Vamos explicar isto melhor. Suponha que uma onda gravitacional esteja se deslocando ao longo do eixo z, no sentido z+ (FIGURA 10.2), perpendicular ao plano xy. A polarização mais (+) causaria uma circunferência de partículas teste (no formato de um bambolê) oscilar de forma a se esticar e contrair nas direções perpendiculares x e y. Já a polarização cruzada (×) faria a circunferência de partículas oscilar no plano perpendicular ao eixo z, mas com contrações e elongações em direções formando ângulos de 45^{o} com os eixos x e y.

Figura 10.2: Deformação de um círculo devido a forças induzidas por ondas h+ ou h× puras.

Poderíamos definir uma amplitude h para a onda gravitacional como sendo a razão entre a deformação espacial ! L que ela causa num determinado comprimento L, sobre este

comprimento L, ou seja, h = ! L / L. Note que esta amplitude, como foi definida, é adimensional (sem dimensão). Esta amplitude h seria uma composição das duas amplitudes das polarizações mais e cruzada.

$$h = !\quad L/L = ((h_+)^2 + (h_x)^2)^{1/2}$$

(Equação 10.1)

Uma onda, com uma determinada amplitude e polarização, poderia ser decomposta nas duas polarizações lineares puras mais (+) e cruzada (×), com amplitudes que satisfizessem a equação acima e fases que pudessem compor a polarização da onda original. Para o caso especial, no qual a diferença de fase entre as duas polarizações lineares puras é de 0º, a polarização formada ainda é uma polarização **linear**, mais o ângulo que as contrações e elongações formam com os eixos x e y vai depender das amplitudes das duas polarizações puras. Se as amplitudes forem iguais, o ângulo será de 22,5º. Se as amplitudes forem diferentes, o ângulo vai ser mais próximo da polarização linear pura que tiver a maior amplitude.

Para um outro caso especial da diferença de fase entre as polarizações lineares mais (+) e cruzada (×) ser de 90º e elas terem a mesma amplitude, a polarização resultante será **circular**, e veremos a circunferência de partículas passar a ter o formato de uma elipse em rotação no plano x-y (perpendicular a z).

No caso geral, de um ângulo diferente de 0º, 90º, 180º e 270º e amplitudes quaisquer, a polarização é a **elíptica**, que corresponde as partículas teste descreverem uma elipse em rotação, cuja excentricidade estaria variando à medida que a elipse rodasse.

As ondas gravitacionais que chegassem à Terra produzidas por um sistema binário composto por dois buracos negros ou estrelas de nêutrons, por exemplo, apresentariam polarização linear, circular ou elíptica, se o sistema estivesse orientado "edge-on", "face-on", ou em qualquer outra orientação diferente destas duas, respectivamente.

Bom, então, a conclusão é que se uma onda gravitacional passasse por nós, ela iria provocar um contração e elongação dos nossos corpos, de forma que uma hora ficaríamos baixinhos e gordos e outra hora ficaríamos altos e magros. Nisto você se perguntaria: eu não sinto nada disto, portanto, estas ondas não devem existir!

Não, as ondas existem sim, a explicação é que ela tem uma amplitude muito, muito, muito pequena. Uma onda gravitacional gigantesca, digamos uma onda "tsunami" com

amplitude h ~ 10^{-18}, raríssima, que ocorre a cada ~100 anos, que passasse por nós, não conseguiria mudar a nossa altura mais do que a milésima parte do diâmetro de um próton! Portanto, felizmente as ondas gravitacionais não vão causar nenhuma dor nos nossos corpos, por mais fortes que elas sejam. Por outro lado, infelizmente, elas são muito difíceis de serem detectadas, por causa das amplitudes tão pequenas que possuem. Só com instrumentos muito sensíveis, construídos com altíssima tecnologia, é que foi possível detectá-las.

10.2.2 PROVA DE QUE ELAS EXISTIAM

Muito antes de conseguirmos detectar ondas gravitacionais, a comunidade científica da área de relatividade geral e gravitação já tinha certeza de que elas existiam. Primeiro houve um convencimento do ponto de vista teórico e depois um do ponto de vista observacional, apesar de indireto.

O convencimento do ponto de vista teórico não ocorreu quando Einstein propôs a existência das ondas gravitacionais em 1916, mas sim meio século depois. Durante cinco décadas ocorreu um debate teórico na comunidade científica especializada em relatividade geral e gravitação a respeito da existência física das ondas gravitacionais. Muitos achavam que as ondas gravitacionais eram apenas um artifício matemático derivado da teoria da relatividade geral, sem existência real física. O próprio Einstein chegou a duvidar que elas fossem reais. Ele quase publicou um artigo na década de 30 negando a existência dessas ondas. Felizmente o trabalho dele foi modificado antes da publicação, graças ao cientista encarregado para julgar o trabalho, H. P. Robertson, que não concordou com Einstein. Porém, Einstein, até a sua morte em 1955, não tinha certeza se afinal as ondas gravitacionais que ele tinha derivado a partir da sua teoria da relatividade geral tinham realmente existência física.

Somente na década de 60, que trabalhos foram publicados demonstrando que ondas gravitacionais realmente carregavam energia e, portanto, teriam existência física. Entretanto, sempre continuaram a existir alguns céticos (até hoje).

A prova observacional da existência de ondas gravitacionais ocorreu na segunda metade da década de 70. Russell Hulse e Joseph Taylor descobriram em 1974 um sistema

binário formado por duas estrelas de nêutrons, das quais uma delas era um *pulsar*. Uma estrela de nêutrons é um objeto astrofísico formado principalmente por nêutrons, que tem um diâmetro de aproximadamente 20 km e uma massa um pouco maior que a do Sol. Um *pulsar* é uma estrela de nêutrons que apresenta o produto do campo magnético com a rotação suficientemente alto para emitir um feixe de rádio capaz de ser detectado na Terra, se este feixe "varrer" o nosso planeta na rotação da estrela, da mesma forma como o facho de luz de um farol "varre" o nosso rosto.

O feixe de rádio era detectado pelo radiotelescópio de Arecibo, em Porto Rico, aquele mesmo radiotelescópio do filme "Contato". Como o *pulsar* tinha uma rotação extremamente regular, conhecia-se o seu período de rotação com 14 casas decimais significativas (o seu período era de 0,059029997929613 s)! Dessa forma, Hulse pode observar a variação da chegada dos pulsos do pulsar à medida que este orbitava a outra estrela de nêutrons, graças ao efeito Doppler. Quando o *pulsar*, durante a órbita, se aproximava da Terra, os pulsos chegavam em intervalos menores que aquele período do *pulsar*. Quando ele se afastava, o contrário ocorria, os pulsos se intervalavam de um tempo maior que o período do *pulsar*. Ficava claro que esta sequência se repetia, e, logicamente, o período dessa repetição cíclica era o outro período, o período da órbita do *pulsar* em torno da sua estrela de nêutrons companheira. Era o primeiro sistema binário formado por duas estrelas de nêutrons descoberto. Outros sistemas como este seriam descobertos anos depois. Porém, o mais interessante estava para ser descoberto. Taylor continuou a medir o período orbital desse sistema nos anos que se seguiram e os resultados mostravam que este período estava diminuindo, na mesma proporção prevista pela teoria da relatividade geral em razão da emissão de ondas gravitacionais pelo sistema binário. Já em 1979, havia dados suficientes para ficar clara esta concordância. Taylor continuou a fazer as contas nos anos seguintes e, finalmente, em 1993, a Academia Sueca deu a eles (Hulse e Taylor) o prêmio Nobel de Física, por causa desta descoberta. As ondas gravitacionais não estavam sendo detectadas, mas o efeito de retirada de energia do sistema na emissão dessas ondas estava sendo observado, portanto era uma prova indireta da existência de ondas gravitacionais.

10.2.3 MÉTODOS DE DETECÇÃO E DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Ora, se ondas gravitacionais retiram energia de um sistema mecânico formado por duas estrelas de nêutrons no processo de emissão, então, deveria ser possível absorver energia dessas ondas no processo inverso, o de detecção. Levando-se em conta as polarizações lineares puras das ondas gravitacionais, poderiam ser projetados detectores adequados para a detecção dessas ondas.

Foi Joseph Weber quem primeiro propôs a construção de um detector de ondas gravitacionais que poderia funcionar. A proposta dele, publicada em 1960, consistia de uma barra maciça de alumínio em formato cilíndrico, de aproximadamente 1,5 metros de comprimento e um metro de diâmetro, e de alta figura de mérito de oscilação mecânica. Esta barra era suspensa pela região central por uma haste muito fina (poucos milímetros de diâmetro) e forte, cujas duas extremidades eram presas, cada uma, a duas pilhas de blocos de aço e borracha, para amortecer as vibrações do chão do laboratório, e mantida dentro de uma câmara de vácuo de forma a deixá-la livre para oscilar, sem a influência de ruído sonoro ou sísmico. Dezenas de cristais piezoelétricos eram colados na região central da barra e conectados em série. Cristais piezoelétricos, quando deformados, produzem voltagens (eles são usados, por exemplo, em acendedores de fogão). Quando eles são conectados em série, a voltagem resultante é a soma das voltagens de todos os cristais. Mesmo para pequenas deformações da barra, causadas pela passagem de uma onda gravitacional, a voltagem resultante poderia, se não fosse tão franca, ser detectada. Esses cristais piezoelétricos faziam o papel de transdutores (sensores), que transformavam as energias vibracionais mecânicas em elétricas. Quando a onda gravitacional passasse, parte da energia da onda era convertida em energia mecânica de oscilação da barra. A conversão era maximizada se a onda chegasse perpendicular à barra e tivesse polarização mais (+), considerando que o eixo da barra estava alinhado com o eixo x (ou y). Utilizando este princípio, essas barras de Weber chegaram a ter sensibilidade para medir uma onda com amplitude adimensional h da ordem de 10^{-15}, o que, infelizmente, não foi suficiente para uma detecção, apesar de Weber ter sempre afirmado que havia detectado ondas gravitacionais em 1969.

A geração seguinte de barras foi construída a partir da década de 70. Elas eram, na sua maioria, barras com 3 metros de comprimento e 60 cm de diâmetro e eram todas resfriadas a temperaturas próximas da temperatura de ebulição do hélio líquido (4,2 K). Desta forma, o ruído térmico (Browniano) era muito menor. Para ajudar, nestas baixas temperaturas, as figuras de mérito mecânica dos sólidos (Q_m) eram bem maiores que as mesmas à temperatura ambiente, e a propriedade de supercondutividade do nióbio poderia ser utilizada para a operação dos transdutores. Desta forma, os novos transdutores puderam "aposentar" os cristais piezoelétricos que estavam sendo utilizados à temperatura ambiente. As barras criogênicas, como eram chamadas, operaram nas décadas de 80, 90 e anos 2000. Elas agora já estão todas "aposentadas" (Niobe aposentada em 2001, Allegro em 2007, Explorer em 2010, Nautilus e Auriga em 2014). Elas chegaram a sensibilidades, em uma banda de 30 Hz em torno de 900 Hz, da ordem de 10^{-21} $Hz^{-1/2}$, que para sinais *bursts* (impulsivos), em ~100Hz da banda desses detectores, correspondia a um h ~ 10^{-20}.

A terceira geração de "barras", na verdade melhor chama-las de "massas ressonantes", foram as esferas de cobre-alumínio que compunham os detectores Mini-GRAIL, construído na Holanda, e o Mario Schenberg, construído no Brasil. O princípio ainda era o mesmo, de absorção de parte da energia da onda gravitacional, agora por esferas de 68 cm e 65 cm de diâmetro, que correspondiam a 1300 kg e 1150 kg, respectivamente. O Mini-GRAIL operou até 2009 na Universidade de Leiden. O Schenberg operou no IFUSP até 2015 e encontra-se desmontando no INPE, aguardando uma oportunidade para ser remontado no laboratório de ondas gravitacionais Sérgio Ricardo Furtado, no INPE. Ambos chegaram a operar em uma banda de ~70 Hz em torno de ~ 3 kHz Hz, com sensibilidade da ordem de 10^{-20} $Hz^{-1/2}$. Maiores sensibilidades podem ser alcançadas se estes projetos tiverem continuidade. A sensibilidade de projeto é algo em torno de 10^{-22} $Hz^{-1/2}$.

Também na década de 70, foram construídos os primeiros interferômetros laser para detecção de ondas gravitacionais. De maneira semelhante a um interferômetro Micheson-Morley, os braços do interferômetro para detecção de ondas gravitacionais são horizontais e perpendiculares entre si. O princípio de detecção dos interferômetros se baseia na simples variação das distâncias relativas produzida pela passagem de uma onda gravitacional. O sinal é maximizado, quando a onda gravitacional chega

perpendicular ao plano que contém o interferômetro e com a polarização mais (+), supondo que os braços estão alinhados com as direções x e y, respectivamente. O princípio de funcionamento do interferômetro do tipo Michelson-Morley detecta esta variação de comprimento dos braços, vejamos por que: O feixe que sai do laser é inicialmente dividido em dois feixes perpendiculares, por um divisor de feixes (um espelho 50% transparente colocado em um ângulo de 45º com o feixe inicial. Cada um dos feixes divididos percorre um dos braços perpendiculares. Ao final de cada braço, esses feixes encontram espelhos 100% refletores que os enviam de volta ao ponto de partida, o divisor de feixes, que os divide novamente. Parte do feixe que voltou de um braço é juntada com parte do feixe que voltou do outro braço e enviada a um sensor de luz (fotodiodo ou fotodetector). Então, as distâncias entre os espelhos são ajustadas para que os dois feixes fiquem com fases 180º entre si (fases contrárias). Desta forma, não é registrada nenhuma luz no fotodetector. A chegada de uma onda gravitacional muda esta situação de interferência máxima, fazendo com que alguma luz seja registrada no fotodetector.

Na prática, os interferômetros LIGO, que realizaram as primeiras detecções de ondas gravitacionais, são um pouco mais complicados do que isto. Primeiro, porque os feixes de luz em cada braço não vão e voltam apenas uma vez, mas várias. Existem espelhos quase 100%, mas não exatamente 100%, que são colocados próximos do divisor de feixe, formando as chamadas cavidades de Fabry-Perot com os espelhos 100% no final de cada braço. Estes espelhos adicionais fazem com que os feixes façam várias viagens de ida e volta ao longo dos braços, acumulando uma potência em circulação nos braços que pode chegar 100 kW ou mais, apesar da fonte de laser ser de apenas algumas poucas dezenas de Watts (20 W, por exemplo). Segundo, porque existem espelhos que refletem a luz laser que tenta voltar para a fonte de laser, são os chamados espelhos de reciclagem de energia, para não desperdiçar luz laser no detector, aproveitando toda ela. E terceiro, porque também existem espelhos que ficam na frente dos fotodetectores, os chamados espelhos de reciclagem de sinal. Eles têm a finalidade de aumentar a sensibilidade do interferômetro para frequências especificas (desde que esteja dentro da faixa de sensibilidade do interferômetro), em busca de sinais periódicos nessas frequências específicas.

Os interferômetros LIGO tem braços de 4 km de comprimento e estão localizados em Livingston (Louisiana) e Hanford (Washington), nos EUA, separados cerca de 3 mil km entre si (uma onda gravitacional viajando de um sítio para o outro levaria 10 ms para fazer o percurso). O comprimento de onda do laser utilizado é de 1064 nm ou 1,064 !   m (mícron) e a faixa de frequências na qual o LIGO tem a sua maior sensibilidade é de 50Hz até 1kHz. Em torno de 200 Hz a sua sensibilidade chega a $\sim 10^{-23}$ Hz$^{-1/2}$, mas vai melhorar ainda mais. O grupo do INPE é um dos dois grupos no Brasil que participam desta Colaboração Científica LIGO (sigla LSC em inglês). Ele participa nela desde 2011. Existem ainda outros interferômetros: o Virgo, em Cascina (perto de Pisa), na Itália, com braços de 3 km, GEO600, em Hannover, na Alemanha, com braços de 600 metros, KAGRA, na mina de Kamioka, no Japão, subterrâneo, com braços de 3 km e espelhos resfriados, e um projeto de construção na Índia, o LIGO Índia.

Existem também projetos de interferometria laser no espaço tais como o LISA, DECIGO e BBO. O mais famoso deles é o *Laser Interferometer Space Antenna* (LISA), desenvolvido pela ESA e a NASA, que pretende colocar três espaçonaves em órbita do Sol, à mesma distância que a Terra se encontra dele, mas cerca de 20^{o} atrasada em relação à órbita da Terra. Estas três espaçonaves formariam um triângulo equilátero de 2,5 milhões de quilômetros de lado. Feixes de laser de 2 W seriam enviados de cada espaçonave para as duas outras e recebido por elas por telescópios refletores. O lançamento está previsto para ocorrer antes de 2030. Uma boa parcela do sucesso desta missão já ocorreu no lançamento e funcionamento do *LISA Pathfinder*. A sensibilidade alcançada em aceleração medida ultrapassou todos os requisitos previstos para o *LISA Pathfinder* e inclusive os necessários para o LISA. Diante deste excelente desempenho e da recente detecção de ondas gravitacionais por interferometria laser, o projeto LISA recebeu várias aprovações que o colocaram novamente na previsão de lançamento e voltou a receber apoio da NASA. O LISA vai ter a sua melhor sensibilidade na faixa em frequências de 1 a 100 mHz e o DECIGO na faixa de 100 mHz a 10 Hz. O BBO (*Big Bang Observer*) também vai ter sensibilidade nessa faixa do DECIGO e pretende descobrir se o universo “nasceu” no Big Bang ou teve uma existência anterior e, neste caso, o Big Bang não existiu exatamente como descrito no modelo padrão.

Outro método de detecção de ondas gravitacionais menos conhecido é o *Pulsar timing array*. Trata-se do uso de radiotelescópios para monitorar a chegada dos pulsos dos

pulsares mais regulares que existem sendo observados. Atualmente são cerca de 40 a 50 o número de pulsares regulares que são observados. Eles são pulsares isolados, que mantem uma regularidade excepcional no seu período de rotação. Desta forma, podemos prever com precisão os momentos exatos da chegada dos seus pulsos, levando-se em conta as correções Doppler devidas à rotação da Terra em torno de si mesma e devidas à translação da Terra em torno do Sol. Comparamos, então, estes momentos teóricos previstos pelo modelo com os momentos reais observados com radiotelescópios, procurando por desvios ou resíduos, ou seja, discrepâncias entre os tempos teóricos previstos e os medidos/observados. Estes resíduos seriam indícios de que uma onda gravitacional passou pelo pulsar ou pela Terra. A maior sensibilidade destes projetos está na faixa de 10^{-9} a 10^{-8} Hz, que corresponde a período da ordem de décadas. Portanto, os 40-50 pulsares não precisam ser monitorados continuamente. Basta que observemos cada um por cerca de algumas horas a cada 6 meses.

Em 2014, o grupo do projeto *Bicep2* anunciou que havia detectado ondas gravitacionais. Infelizmente, uma análise dos dados mais detalhada mostrou que isto não havia ocorrido. Entretanto, esta metodologia de busca continua sendo utilizada até hoje. O que estes grupos buscam são indicações de polarização do modo B na radiação cósmica de fundo eletromagnética em micro-ondas. Elas seriam evidências de ondas gravitacionais na faixa de frequência de 10^{-18} a 10^{-15} Hz, que correspondem a comprimentos de onda da ordem do universo observável, teriam origem no Big Bang e no período do universo que ele sofreu a inflação e estariam registradas nos fótons que conseguiram desacoplar com a matéria quando o universo foi ficando cada vez menos denso e passou a ser transparente para estes fótons. Isto ocorreu quando o universo tinha cerca de 380 mil anos de idade, na teoria na qual ele “nasceu” no Big Bang.

Existem ainda outros métodos de detecção, porém menos explorados. Existem poucos e são pequenos os grupos tentando estes métodos. Eles procuram detectar ondas gravitacionais em frequências mais altas (acima de 100 kHz), mas como não são previstos processos físicos/astrofísicos eficientes para a produção de ondas gravitacionais nessas faixas de frequências e as sensibilidades destes detectores não são muito boas ou promissoras, estes métodos não serão mencionados nesta apostila.

10.3 FONTES ASTROFÍSICAS DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Todas as tentativas de produção artificial de ondas gravitacionais pelo homem capazes de serem detectadas pelos detectores atuais estão condenadas ao fracasso, mesmo envolvendo energias fornecidas por bombas atômicas ou de hidrogênio. As amplitudes produzidas estão ordens e ordens de magnitude aquém do detectável.

Entretanto, existem fontes astrofísicas no universo capazes de produzir sinais tão fortes em ondas gravitacionais (variações significativas de momento de quadrupolo de massa), que mesmo estando a milhões ou bilhões de anos-luz (a-l) da Terra, os sinais poderiam ser detectados (como foram realmente).

Existem várias fontes astrofísicas de ondas gravitacionais:

- sistemas binários compactos, tais como pares de buracos negros (estelares ou supermassivos), pares de estrelas de nêutrons ou pares envolvendo um buraco negro e uma estrela de nêutrons, tanto na sua fase orbital, como na coalescência e *ring-down*;
- sistemas binários de outras estrelas (anãs-brancas e/ou estrelas comuns);
- supernovas;
- buracos negros em oscilação, por causa de algo que caiu neles;
- estrelas de nêutrons em oscilação, por causa de algo que caiu nelas;
- estrelas de nêutrons em rotação não axialmente simétrica (presença de uma "montanha", por exemplo);
- o Big Bang e o período inflacionário;
- objetos astrofísicos exóticos, cuja existência ainda não foi confirmada, tais como: cordas cósmicas, buracos negros primordiais, bolhas cósmicas, estrelas de bósons e estrelas estranhas;
- fundo cosmológico produzido por um conjunto muito grande de fontes astrofísicas (sistemas binários e supernovas, principalmente).

De todas estas fontes, as primeiras a serem detectadas forma sistemas binários de buracos negros estelas, como vamos ver na próxima seção.

10.4 A ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS FOI INAUGURADA!

Em 14 de setembro de 2015, ainda durante o período de testes de engenharia (chamado de ER8), as versões avançadas dos interferômetros LIGO (os aLIGO) detectaram um sinal forte de ondas gravitacionais vindo de uma região do céu próxima do polo sul da Terra. Foi uma surpresa, por dois aspectos: primeiro, porque os aLIGO iam entrar em operação de busca astrofísica (a chamada O1) somente a partir do dia 18 de setembro e, portanto, ninguém estava esperando uma detecção tão cedo (o fato é que eles já estavam com excelente sensibilidade); segundo, porque o sinal era muito forte ($h \sim 10^{-21}$) e com componentes em frequências (de 30Hz a 250Hz) exatamente na faixa de maior sensibilidade dos aLIGO. Parecia um sinal artificial introduzido no sistema de aquisição de dados, num processo conhecido por injeção de sinal, já utilizado algumas vezes para se verificar se os programas computacionais construídos eram capazes de detectar sinais de ondas gravitacionais nos dados. Entretanto, foi verificado que não ocorreram injeções artificiais e após um mês de análises, os membros das colaborações LIGO e Virgo tinham mais de 5! em significância estatística que estavam lidando com um sinal verdadeiro, que foi batizado de GW150914, em razão da data na qual foi detectado.

O sinal, com duração de aproximadamente 0,2 segundos, começou a ser detectado primeiro no interferômetro de Livingston (Louisiana) e cerca de 7 milisegundos mais tarde no de Hanford (estado de Washington). Após a análise completa, concluiu-se que se tratava do sinal das ondas gravitacionais emitidas nas últimas ~5 órbitas e coalescência de dois buracos negros estelares pertencentes a um sistema binário. As massas dos buracos negros eram de 36 e 29 massas solares. Após a coalescência restou um buraco negro de 62 massas solares com um spin igual a 0,65 (1 é o máximo). Cerca de 3 massas solares foram emitidas no pulso final de ondas gravitacionais. A energia libertada pelo pico do evento GW150914 foi mais do que seis vezes maior do que a luz combinada de todas as estrelas e galáxias no universo observável. A potência no pico da emissão foi de $3,6 \times 10^{56}$ erg/s. Este evento ocorreu a uma distância de 1,3 bilhões de anos-luz da Terra. Os buracos negros, antes do choque, chegaram a orbitar entre si com 60% da velocidade da luz! Imagine dois gigantes num “pega” a essa velocidade! Para os

aLIGO detectarem eles foram capazes de perceber uma variação na distância entre os espelhos de apenas ~10^{-18} metros, o que é mil vezes menor que o diâmetro de um próton! Uma imagem dessas ondas pode ser vista na FIGURA 10.3.

Figura 10.3: Ondas gravitacionais de GW150914 https://www.youtube.com/watch?v=kkKDs59zcdI

Em 12 de outubro de 2015 foi detectado outro evento na corrida O1, mas a significância estatística era baixa (menor que 2!) e, portanto, não foi levado muito a sério. Porém, em 26 de dezembro chegou outro também com significância estatística em torno de 5! . No total foram detectadas, com alta significância estatística e até o final da corrida O2 (a qual se encerrou em 25 de agosto de 2017), as últimas órbitas e coalescência de cinco binárias de buracos negros (batizadas, respectivamente de GW150914, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814), além de uma binária de estrelas de nêutrons. Esta última binária (GW170817), detectada no dia 17 de agosto de 2017, deu um show após a coalescência das estrelas de nêutrons.

Com o evento GW150914 foi inaugurada a Astronomia ou Astrofísica de Ondas Gravitacionais, uma nova janela para se observar o universo, mas com o evento

GW170817 foi inaugurada uma outra nova astronomia, a Astronomia Multimensageira com Ondas Gravitacionais que talvez, com mais probabilidade que a primeira, vá revolucionar o conhecimento que temos do universo.

Essas descobertas foram tão importantes que rederam o prêmio Nobel de Física de 2017. Os três agraciados: Rainer Weiss, Kip S. Thorne e Barry C. Barish, representam bem a colaboração que detectou estes eventos.

10.5 O QUE APRENDEMOS COM AS PRIMEIRAS ONDAS GRAVITACIONAIS OBSERVADAS?

Como mencionado na seção anterior, até a segunda corrida observacional O2, que se encerrou em 25 de agosto do 2017, foram detectados, com alta significância estatística, cinco eventos envolvendo pares de buracos negros e um evento envolvendo um par de estrelas de nêutrons. Na tabela 10.1, são resumidos os parâmetros principais obtidos para os pares de buracos negros detectados através da análise dos sinais *chirp* (gorjeio) da evolução das suas órbitas, seguidos da coalescência e *ring down* (ressoar) devido ao choque do par.

	GW150914	GW151226	GW170104	GW170608	GW170814
Razão S/R	23,7	13,0	13	13	15
Taxa de falso alarme	(~ 400 mil anos)$^{-1}$	(~ 400 mil anos)$^{-1}$	(70 mil anos)$^{-1}$	(160 mil anos)$^{-1}$	(140 mil anos)$^{-1}$
M primária	36,2 $M_\odot$	14,2 $M_\odot$	31,2 $M_\odot$	12 $M_\odot$	30,5 $M_\odot$
M secundária	29,1 $M_\odot$	7,5 $M_\odot$	19,4 $M_\odot$	7 $M_\odot$	25,3 $M_\odot$
Massa total	65,3 $M_\odot$	21,8 $M_\odot$	50,7 $M_\odot$	19 $M_\odot$	55,9 $M_\odot$
Massa final	62,3 $M_\odot$	20,8 $M_\odot$	48,7 $M_\odot$	18,0 $M_\odot$	53,2 $M_\odot$
Spin final	0,68	0,74	0,64	0,69	0,70
E irradiada	3,0 $M_\odot c^2$	1,0 $M_\odot c^2$	2,0 $M_\odot c^2$	0,85 $M_\odot c^2$	2,7 $M_\odot c^2$
Pico de Luminosidade	$3{,}6 \times 10^{56}$ erg/s	$3{,}3 \times 10^{56}$ erg/s	$3{,}1 \times 10^{56}$ erg/s	$3{,}4 \times 10^{56}$ erg/s	$3{,}7 \times 10^{56}$ erg/s
Distância de luminosidade	420 Mpc (1,4 G a-l)	440 Mpc (1,4 G a-l)	880 Mpc (2,9 G a-l)	340 Mpc (1,1 G a-l)	540 Mpc (1,8 G a-l)
Redshift	0.09	0,09	0,18	0,07	0,11

Tab. 10.1–Parâmetros dos eventos envolvendo pares de buracos negros (a-l é anos-luz)

Diferentemente dos quatro primeiros, que foram detectados apenas pelos dois interferômetros aLIGO, o último, GW170814, também foi detectado pelo interferômetro Virgo. Por esta razão, a localização do último evento foi muito mais precisa que as dos anteriores. Se apenas usássemos as informações dos dois aLIGO, o evento GW170814 seria localizado em uma área de 1160 graus (com 90% de credibilidade). Adicionando

as informações do interferômetro Virgo, a área de localização fica reduzida para apenas 60 graus!

A detecção tripla de GW170814 também permitiu que fosse possível se testar a natureza das polarizações das ondas gravitacionais, permitindo assim uma nova classe de testes fenomenológicos da gravitação e da teoria da Relatividade Geral de Einstein. Foi encontrado que os dados favorecem fortemente as polarizações tensoriais puras de ondas gravitacionais, sobre as polarizações escalares ou vetoriais puras. Um resultado que vai no sentido da comprovação da relatividade geral, já que ela só prevê as componentes tensoriais (mais e cruzada).

Em média, as massas encontradas para os buracos negros detectados foi um pouco maior do que se esperava, com base no conhecimento que tínhamos dos sistemas binários emissores de raios-X. Isto fez com que a própria teoria de evolução estelar, para explicar como esses buracos negros com mais massa foram formados, fosse colocada em cheque. Por outro lado, também levantou a hipótese de que estes buracos negros mais massivos não teriam origem na evolução estelar, mas seriam produtos do universo primordial, ou seja, teriam origem no nascimento do universo, como defeitos topológicos do Big Bang. Nesta hipótese eles estariam contribuindo para uma parcela da massa da matéria escura no universo.

Essas detecções também serviram para se limitar a massa da partícula gráviton, que na teoria quântica seria o quantum do campo de ondas gravitacionais e, portanto, a sua partícula mediadora. A massa do gráviton, caso ele tenha massa (a teoria da relatividade geral postula que ele não tem, ou seja, que a massa dele é zero), não poderia ser maior que 10^{-58} kg!

Vários outros testes de teorias da gravitação (que incluem a relatividade geral), foram feitos com os resultados destes cinco eventos envolvendo binárias de buracos negros, porém eles estão fora do escopo desta apostila, em razão de serem de um nível mais técnico e avançado da física.

Distintamente de todos os cinco eventos descritos anteriormente, envolvendo pares de buracos negros, o sexto evento, observado em 17 de agosto de 2017 e, portanto, batizado de GW170817, emitiu muita radiação no espectro eletromagnético.

O evento GW170817 tratava-se das ondas gravitacionais observadas das últimas ~1500 órbitas e coalescência de um par de estrelas de nêutrons. A duração do evento registrado foi de aproximadamente 56 segundos! Batendo de longe o recorde anterior de GW151226, o mais longo dos eventos envolvendo buracos negros, que havia demorado ~1,7 segundos! Ele também foi o mais próximo, distante "apenas" 40 Mpc (130 M a-l). Os parâmetros deste evento são apresentados na tabela 10.2, supondo que as estrelas de nêutrons não tinham muita rotação.

Razão S/R	32,4
Taxa de falso alarme	(1,1 milhões anos)$^{-1}$
M primária	1,48 M$_\odot$
M secundária	1,26 M$_\odot$
Massa total	2,74 M$_\odot$
Massa final	2,71 M$_\odot$
E irradiada	> 0,025 M$_\odot$c^2
Pico de Luminosidade	3,6 x 10^{56} erg/s
Distância de luminosidade	40 Mpc (130 M a-l)
Redshift	0,008

Tabela 10.2–Parâmetros do evento GW170817 (a-l é anos-luz).

Por ter sido detectado por três interferômetros, a localização do evento, com 90% de confiança, ficou restrita a uma área no céu menor que 55°. Isto ajudou muito todos os outros grupos de astrônomos que observam no espectro eletromagnético a localizarem em qual galáxia o evento ocorreu. E eles tinham muitas razões para fazerem isto. Cerca de 1,7 segundos depois do horário que os interferômetros laser haviam registrado que as estrelas de nêutrons haviam coalescido, os satélites *Fermi* (NASA) e *INTEGRAL* (ESA) detectaram um pulso de raios-gama. Ficava claro que se tratava de uma coalescência de estrelas de nêutrons e que elas realmente, como se suspeitava, eram a causa de *bursts* de raios-gama de curta duração. Foi um alarme geral para a comunidade de astrônomos que havia assinado acordos de busca multimensageira com a Colaboração Científica LIGO.

Esta comunidade, formada por cerca de 70 grupos, começou uma busca implacável por sinais eletromagnéticos nas bandas de rádio, infravermelho, óptico, ultravioleta, raios-X e por raios cósmicos e neutrinos. Tanto a busca, como os resultados da busca foram interessantíssimos e os resultados acabaram sendo publicados em um trabalho com mais de 3700 autores.

O primeiro sinal eletromagnético detectado depois das ondas gravitacionais e do pulso de raios-gama foi um sinal no óptico. Ele foi encontrado pelo grupo do telescópio Swope, quase 11 horas despois, na galáxia NGC4993, que justamente está localizada dentro da área no céu que os interferômetros laser disseram ter ocorrido o evento e dista 130 milhões de anos-luz da Terra, a mesma distância na qual eles haviam dito que o evento ocorrera. Vários outros grupos, observando no óptico, detectaram em seguida. Entre eles estão o da *Dark Energy Camera* e do *T80 South*, ambos com participação de brasileiros (e brasileiras). Em seguida, foi detectado sinal, ainda dentro das primeiras 24 horas da coalescência, no infravermelho e no ultravioleta. Sinais em raios-X e rádio só apareceram 9 e 16 dias depois, respectivamente, quando os sinais no ultravioleta e no óptico já tinham desaparecido e o em infravermelho estava por terminar. O sinal de raios-X durou apenas poucas horas. Porém, o de rádio foi o de mais longa duração. Ele durou meses, com um pico a 149 dias depois da coalescência.

A primeira conclusão de toda esta observação multimensageira, pelo fato do pulso de raios-gama ter chegado apenas 1,7 segundos depois da coalescência das duas estrelas de nêutrons, foi que a velocidade das ondas gravitacionais não pode diferir mais do que uma parte em 10^{15} da velocidade das ondas eletromagnéticas. Desta forma, uma série de teorias de gravitação que previam diferenças de velocidades maiores do que esta, tiveram que ser descartadas ou revisadas.

As ondas gravitacionais sozinhas forneceram elementos suficientes no caso de GW170817 para se tirar três conclusões (entre outras tantas): novamente, as polarizações das ondas gravitacionais são consistentes com a natureza tensorial e a massa do gráviton não poderia ser maior que 10^{-58} kg, resultados que estão em concordância com a teoria da Relatividade Geral, e pôde-se dizer algo sobre a equação de estado da matéria nuclear de estrelas de nêutrons.

Também foi concluído, agora a partir das curvas de luz no espectro eletromagnético, que o choque das duas estrelas de nêutrons desencadeou um evento chamado na literatura de *Quilonova*, o qual, no caso de GW170817, teria sido o responsável por produzir, pelo menos, ~0,05 massas solares (ou cerca de 17 mil Terras) de elementos pesados, com número atômico maior que o do ferro, incluindo ouro, platina e urânio, demonstrando que coalescências de estrelas de nêutrons desempenham um papel no processo r de nucleossíntese no Universo.

Finalmente, a observação de GW170817 permitiu o cálculo da constante de Hubble de forma independente dos métodos astronômicos clássicos. O resultado foi consistente com os valores obtidos anteriormente por observações no espectro eletromagnético. Precisões maiores são previstas em detecções futuras de ondas gravitacionais.

Infelizmente, não foi possível se determinar se as duas estrelas de nêutrons, após coalescerem, formaram uma estrela de nêutrons mais massiva (de 2,74 $M_\odot$) ou um buraco negro. O sinal em ondas gravitacionais que indicaria qual teria sido o produto final, foi fraco demais para ser detectado pelos interferômetros laser aLIGO e Virgo. No futuro, estes detectores deverão estar operando com maior sensibilidade e/ou podemos ter sorte de observar coalescência mais próximas de estrelas de nêutrons.

10.6 E QUAL É O FUTURO DA ASTROFÍSICA DE ONDAS GRAVITACIONAIS?

Detectores de ondas gravitacionais, desde os tempos de Weber, sempre estiveram em continuo aperfeiçoamento. Não foi diferente com o LIGO e o Virgo. Neste processo de aperfeiçoamento estes dois últimos acabaram detectando ondas gravitacionais de fato: o LIGO, na sua versão aLIGO, pela primeira vez em 2015, e o Virgo em 2017. Eles vão continuar a serem aperfeiçoados, com o objetivo de observarem mais eventos, mais fracos e/ou mais distantes. A próxima versão do LIGO, que vai substituir o aLIGO, é o A+, que vai entrar em operação no final de 2018, juntamente com uma versão aperfeiçoada do Virgo avançado, na chamada terceira corrida observacional (O3). Nessa versão A+ do LIGO, será realizada *squeezing* da luz laser, uma técnica que melhora a precisão das medidas e, com isto, a sensibilidade do interferômetro. O A+ vai sofrer

alguns ajustes e ainda operar por mais duas corridas O4 e O5. Depois ele sofrerá modificações substanciais. Os espelhos de 40 kg de sílica (vidro) serão trocados por espelhos de 200 kg de silício, os quais serão resfriados e mantidos a temperatura de 123K, na qual o silício apresenta um ruído térmico muito reduzido por causa de uma variação anômala na sua expansão térmica nesta temperatura. Esta versão se chama *LIGO Voyager*, e o grupo de ondas gravitacionais do INPE (GWINPE) tem participação direta no desenvolvimento deste projeto, que deverá estar operacional em torno de 2027. Uma outra parte do GWINPE trabalha na identificação dos ruídos na análise de dados e vai estar trabalhando em todas essas corridas, inclusive nas do *LIGO Voyager*.

A sensibilidade da versão A+ na corrida O5 será cerca de 3 vezes melhor em amplitude que a versão que operou em O2. Isto significa que os interferômetros LIGO A+ vão conseguir observar a distâncias 3 vezes maiores, ou seja, volumes do universo 27 vezes maiores (o volume vai com o cubo do raio). A consequência disto é muito animadora. Ora, detectamos até agora cinco pares de buracos negros e um par de estrelas de nêutrons e O5 vai ser uma corrida mais longa que O1 e O2 juntas, portanto, espera-se mais de uma centena de observações para O5, e a versão *LIGO Voyager* deve observar centenas a cada ano, depois que todos os ajustes forem feitos nela.

Paralelamente à operação do *LIGO Voyager* será iniciada a construção de um outro interferômetro, em outro local dos EUA, o chamado *Cosmic Explorer*. Além de também ter os espelhos resfriados, para diminuir o ruído Browniano, ele terá braços de 40 km! A previsão é que ele vai ser capaz de observar centenas de milhares de eventos em alguns anos de operação. Mas para isto, ele não pode trabalhar sozinho. Um grande interferômetro também será construído na Europa, chamado de *Einstein Telescope* ou ET, com braços de 10 km, em forma triangular, também com espelhos resfriados e subterrâneo, como o KAGRA japonês.

Estes novos interferômetros *Cosmic Explorer* e ET estarão operando a partir da década de 2030, juntamente com o LISA. Outra coisa muito interessante é que binárias de buracos negros estelares e estrelas de nêutrons que o LISA detectar entrarão na faixa de detecção daqueles interferômetros de solo cerca de 10 anos depois, para coalescerem! Portanto, poderemos prever com dez anos de antecedência o momento e local exato dessas coalescências, permitindo que os astrônomos/astrofísicos multimensageiros planejem com bastante antecedência programas de observação. Vai haver até tempo

para submeterem projetos de observação nas agências de fomento à pesquisa! Paralelamente, as técnicas de *Pulsar Timing* e Modo B da radiação cósmica de fundo eletromagnética em micro-ondas já deverão ter frutos observacionais.

Desta forma, tudo indica que o futuro para a Astrofísica de Ondas Gravitacionais neste século XXI e nos subsequentes será brilhante.

Um aspecto muito interessante, é que a observação de ondas gravitacionais vai permitir que se descubra se o universo “nasceu” no Big Bang ou teve uma existência anterior ao momento que dizemos ter ocorrido o Big Bang (há 13,8 bilhões de anos atrás), isto porque, diferentemente das ondas eletromagnéticas, o universo sempre foi transparente para as ondas gravitacionais, mesmo durante a monstruosa densidade no momento do Big Bang. Desta forma, as ondas gravitacionais poderão nos dizer exatamente o que ocorreu com o universo. Esta informação vai estar registrada no espectro da radiação de fundo cosmológica em ondas gravitacionais. Se houve um Bing Bang o espectro vai ter uma “cara”. Se, por outro lado, houve uma fase do universo anterior, este se contraiu, mas não chegou a se reduzir a um ponto, mas sim a um volume finito não nulo, o espectro de fundo vai ter outra “cara”, diferente da primeira. Sabemos identificar, a partir da “cara” dos espectros de fundo, o que aconteceu com o universo, portanto, seremos capazes de descobrir como o universo nasceu, basta que consigamos medir este espectro de fundo cosmológico em ondas gravitacionais.

Além de nos dizer como o universo teve início, a astronomia de ondas gravitacionais vai revolucionar o nosso conhecimento da física e astrofísica e, provavelmente, nos ajudar a responder às suas principais questões da atualidade, tais como a matéria escura e a energia escura.

Provavelmente uma nova física vai ser reescrita com informações obtidas através das observações multimensageiras envolvendo ondas gravitacionais. Certamente engenheiros no futuro vão, a partir desta nova física, desenvolver novas tecnologias, que revolucionarão a maneira como vivemos o dia-a-dia.

10.7 BIBLIOGRAFIA

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ABERNATHY, M.'R. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. AGUIAR, O.'D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. ANDERSON, S.'B. ANDERSON, W.'G. ARAI, K., et al. ; Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. Physical Review Letters (Print), v. 116, p. 061102-1-061102-16, 2016.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ABERNATHY, M.'R. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. AGUIAR, O.'D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. ANDERSON, S.'B. ANDERSON, W.'G. ARAI, K. , et al. ; GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence. Physical Review Letters (Print), v. 116, p. 241103, 2016.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ABERNATHY, M.'R. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. AGUIAR, O.'D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. ANDERSON, S.'B. ANDERSON, W.'G. ARAI, K. , et al. ; Binary Black Hole Mergers in the First Advanced LIGO Observing Run. Physical Review X, v. 6, p. 041015-1-041015-36, 2016.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N . **AGUIAR, O.'D.** AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G.

ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. AMATO, A. , et al. ; GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2. PHYSICAL REVIEW LETTERS , v. 118, p. 221101-1-221101-17, 2017.

ABBOTT, B. P. ABBOTT, R. ABBOTT, T. D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R. X. ADYA, V. B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N. Aguiar, O. D. AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G. ALLOCCA, A. ALTIN, P. A. AMATO, A. , et al. ; GW170608: Observation of a 19 Solar-mass Binary Black Hole Coalescence. The Astrophysical Journal, v. 851, p. L35, 2017.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N . **AGUIAR, O.'D.** AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. AMATO, A. , et al. ; GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence. PHYSICAL REVIEW LETTERS , v. 119, p. 141101, 2017.

ABBOTT, B.'P. ABBOTT, R. ABBOTT, T.'D. ACERNESE, F. ACKLEY, K. ADAMS, C. ADAMS, T. ADDESSO, P. ADHIKARI, R.'X. ADYA, V.'B. AFFELDT, C. AFROUGH, M. AGARWAL, B. AGATHOS, M. AGATSUMA, K. AGGARWAL, N . **AGUIAR, O.'D.** AIELLO, L. AIN, A. AJITH, P. ALLEN, B. ALLEN, G. ALLOCCA, A. ALTIN, P.'A. AMATO, A. , et al.; GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. PHYSICAL REVIEW LETTERS , v. 119, p. 161101, 2017.

Aguiar, Odylio Denys. Past, present and future of the Resonant-Mass gravitational wave detectors. Research in Astronomy and Astrophysics, v. 11, p. 1-42, 2011.

Aguiar, O D; BARROSO, Joaquim José Carvalho N C CASTRO, Pedro José de Cedeño M, C E Da Silva Costa, C F de Araujo, J C N Evangelista, E F D Furtado, Sergio R Miranda, O D Moraes, P H R S Pereira, E S Silveira, P R Stellati, C OLIVEIRA JR, Nei Fernandes de Gratens, Xavier de Paula, L A N de Souza, Sérgio T Marinho Jr, R.M. Oliveira, F G Frajuca, C Bortoli, F S Pires, R Bessada, D F A Magalhães, Nadja S. , et al. ; Status Report of the Schenberg Gravitational Wave Antenna. Journal of Physics. Conference Series (Print), v. 363, p. 012003, 2012.

LIGO, http://www.ligo.org/ e http://www.ligo.caltech.edu/

VIRGO, http://www.virgo-gw.eu

GEO600, http://www.geo600.org/

KAGRA http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

LIGO-Índia http://gw-indigo.org/tiki-index.php?page=LIGO-India

LISA, http://sci.esa.int/lisa/ and http://lisa.nasa.gov/

DECIGO http://sites.google.com/site/amaldi8projectwednesday624/abstracts

Big Bang Observer (BBO), http://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang_Observer

NANOGrav, http://www.nanograv.org/

Parkes Pulsar Timing Array (PPTA), http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/ppta

European Pulsar Timing Array (EPTA), http://www.epta.eu.org

Square Kilometre Array (SKA), http://www.skatelescope.org/

EINSTEIN Telescope, http://www.et-gw.eu/

Mario SCHENBERG, http://www.das.inpe.br/graviton/index.html

and http://www.das.inpe.br/video/

MINIGRAIL, http://www.minigrail.nl/

HFGW http://www.sr.bham.ac.uk/gravity/project.php?project=MHzDetector)

Habitabilidade Cósmica e a Possibilidade de Existência de Vida em Outros Locais do Universo

Frederico Vieira,
Dinelsa Machaieie,
Karin Fornazier,
Lia Corazza,
Manoel Castro,
José William Vilas-Bôas,
José Roberto Cecatto,
Carlos Alexandre Wuensche

INPE – Divisão de Astrofísica
Versão 2018

Adaptação do artigo publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física, vo. 40, iss. 4 (2018) para o formato da apostila.

LISTA DE FIGURAS **3**

11.1. INTRODUÇÃO **4**

11.2. CONDIÇÕES COSMOLÓGICAS E ASTROFÍSICAS PARA O SURGIMENTO DE SISTEMAS VIVOS **6**

11.3. A EVOLUÇÃO QUÍMICA DO UNIVERSO **8**

11.3.1. CARACTERÍSTICAS DO MEIO INTERESTELAR 9

11.3.2. FORMAÇÃO DE COMPOSTOS SIMPLES 9

11.3.3. MOLÉCULAS NO MEIO INTERESTELAR E DISCOS PROTOPLANETÁRIOS 11

11.4. ZONA HABITÁVEL E HABITABILIDADE **14**

11.4.1. HABITABILIDADE 15

11.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A VIDA **17**

11.5.1. DOS ÁTOMOS AOS SISTEMAS VIVOS 18

11.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS **20**

11.7. AGRADECIMENTOS **22**

11.8. REFERÊNCIAS **23**

LISTA DE FIGURAS

Figura 11.1 - Tabela periódica demonstrando abundâncias de elementos químicos em porcentagem de peso corporal de organismos vivos terrestres, bem como os elementos indispensáveis ao crescimento e sobrevivência do organismo, chamados de elementos essenciais. (Adaptado de Chopra (2009)). 8

Figura 11.2 - Representação esquemática das principais reações químicas que ocorrem nas nuvens interestelares. O simbolo PAH corresponde a Hidrocarbonetos Poli Aromaticos (Adaptado de Fraser (2002)). 10

Figura 11.3 – Esquema dos estágios primordiais de formação um sistema protoplanetário (Adaptado de Henning & Semenov (2013), Caselli & Ciccarelli (2012)). 12

Figura 11.4 – Fração de abundância do aminoácido glicina e de várias outras espécies similares ou parentes em função do tempo. A linha sólida indica espécies na fase gasosa e as linhas pontilhadas da mesma cor indicam mantos de gelo da mesma espécie. (Adaptado de Garrod (2013b)). 13

12.1. INTRODUÇÃO

A existência de vida no Universo tem permeado o pensamento humano desde os primórdios da civilização. Os avanços científicos do século XX, particularmente a partir da década de 1950, com a exploração do espaço exterior, permitiram um estudo mais aprofundado sobre uma série de fenômenos astronômicos que ampliaram, em muito, a compreensão do Universo. O cenário construído a partir dessas observações, em paralelo com avanços teóricos e modelos computacionais, indica que vivemos num Universo com cerca de 14 bilhões de anos, cuja composição inclui ~96% de matéria e energia escuras, de origem ainda desconhecida, e ~4% de matéria ordinária (basicamente constituída de prótons, nêutrons e elétrons) que deu origem às estrelas e galáxias, observadas principalmente através da emissão de radiação eletromagnética. Uma cronologia da evolução do modelo padrão, bem como uma descrição atualizada e didática do "status" da cosmologia atual pode ser encontrada em (Smoot *et al.* (1992), Bennett *et al.* (1994), Bennett *et al.* (2003), Bennett *et al.* (2013), Ade *et al.* (2014), Ade Ade *et al.* (2016), Patrignani *et al.* (2016)).

Esse cenário descreve o “Modelo Cosmológico Padrão" (doravante MCP), também conhecido como "Big Bang". O MCP prevê que a formação das primeiras estrelas ocorreu quando o Universo tinha de 100 a 200 milhões de anos. Estudos recentes sugerem, inclusive, que as condições para formação das primeiras populações de estrelas começaram antes dos primeiros 100 milhões de anos do Universo (Loeb (2014), Loeb (2016), Naoz *et al.* (2006)), quando o Universo primordial era composto, essencialmente, de Hidrogênio atômico (*H*) e Hélio (*He*). Elementos químicos mais pesados foram produzidos durante o ciclo de reações nucleares das primeiras gerações de estrelas, com massas de dezenas a centenas de vezes a massa do Sol.

A perda de massa por ventos estelares e explosões de supernovas (Nomoto *et al.* (2013), Maio *et al.* (2015), Kulkarni *et al.* (2014)) foram os principais responsáveis pelo enriquecimento do meio interestelar e fizeram com que as gerações de estrelas formadas posteriormente fossem produzidas em ambientes cuja composição química foi gradualmente enriquecida por elementos mais pesados do que o *He*. A consequência natural deste processo foi a síntese de moléculas cada vez mais complexas, em nuvens de gás e poeira cósmica (doravante “nuvens GP”), através de processos químicos na fase gasosa ou reações na superfície dos grãos de poeira (Tielens (2005), Herbst & Van Dishoek (2009), Garrod (2013).

As nuvens GP são regiões adequadas para a observação de moléculas de interesse bioquímico contendo, entre outras, moléculas de metanol (*CH3OH*), formaldeído (*H2CO*) e ácido fórmico (*HCOOH*) (Caselli & Ceccarelli (2012), Ehrenfreund & Chanrley (2000), Van Dishoeck & Blake (1998)). Estas nuvens são também “berçários

estelares". Seu interior frio favorece o colapso gravitacional de regiões que se fragmentam e podem formar estrelas. No caso de estrelas com massas menores que ~ 1 - 1,5 M_{Sol}[1], o colapso gravitacional dá origem a discos proto-planetários e a todos os objetos que compõem este sistema. O cenário acima permite descrever a formação do Sistema Solar, explicando a origem dos planetas rochosos e das condições físico-químicas necessárias para o surgimento da "vida como a conhecemos" (ver, e.g., Taylor (2005), Youdin *et al.* (2013), Williams & Cieza (2011)).

A transição de sistemas não vivos para sistemas vivos é, desde sempre, uma das maiores questões não respondidas da Ciência. Não existe ainda uma definição de vida que não apresente alguma falha, embora exista uma concordância sobre diversas características comuns aos sistemas vivos conhecidos, tais como ausência de equilíbrio termodinâmico; a presença de metabolismo; complexidade e organização; a existência de mecanismos de reprodução; capacidade de desenvolvimento; evolução e autonomia.

A evolução de sistemas químicos complexos é baseada nas propriedades de átomos e moléculas, bem como nas leis da termodinâmica (e.g., Olomucki (1993)). Ao estudar a origem da vida, porém, é necessário lidar com o paradoxo decorrente do fato de sistemas vivos serem compostos de estruturas químicas, inanimadas, extremamente organizadas. Uma forma coerente de tentar explicar o surgimento dos sistemas vivos é, partindo do "Big Bang", analisar a dinâmica e a evolução química do Universo com base no ciclo de formação e evolução estelar, que inclui o conhecimento das reações nucleares que produzem elementos mais pesados do que o *He*. O passo seguinte é explorar a relação entre essa evolução e a química que possibilitou a formação de sistemas planetários e organismos vivos. Essa abordagem é uma das linhas de ação da Astrobiologia, disciplina que estuda a origem, evolução, distribuição e destino da vida no Universo (Cottin *et al.* (2015), Santos *et al.* (2016), Horneck *et al.* (2016)).

O objetivo deste artigo é apresentar o cenário mais aceito da evolução química do Universo e sua relação com a origem dos sistemas vivos como os conhecemos, sob a ótica da Astrobiologia. Um segundo objetivo é sugerir um roteiro que possa ser usado em sala de aula, a partir do ensino médio, para a introdução da disciplina de astrobiologia no ensino de ciências com uma abordagem transdisciplinar.

Como sugestão para professores, além dos artigos de revisão citados ao longo do texto, artigos em português (Damineli (2010), Quillfeldt (2010), Paulino-Lima & Lage (2010), Pacheco (2014)) e textos completos (Zubay (2000), Lunine (2004), Shaw (2006), Horneck (2007), Cockell (2015), Longstaff (2015), Galante (2016)) podem ser utilizados como material básico para um abordagem formal ao tema.

---

[1] M_{Sol} equivale à massa do Sol, cerca de 2×10^{30} kg.

Este artigo está dividido em 6 seções. Após esta introdução, a seção 2 apresenta o modelo cosmológico padrão e o processo de formação das primeiras estruturas, levando à geração inaugural de estrelas. O papel do meio interestelar e das nuvens cósmicas de gás e poeira na formação de moléculas complexas e sistemas protoplanetários é discutido na seção 3. A seção 4 trata das chamadas zonas habitáveis e discute o conceito de habitabilidade. O conceito de vida e a evolução química necessária ao surgimento da mesma são abordados na seção 5 enquanto as considerações finais são apresentadas na seção 6.

12.2. CONDIÇÕES COSMOLÓGICAS E ASTROFÍSICAS PARA O SURGIMENTO DE SISTEMAS VIVOS

O modelo cosmológico que melhor descreve o Universo em grande escala é conhecido como o "Modelo Cosmológico Padrão", também conhecido como modelo ΛCDM (ver, e.g., Ade *et al.* (2014), Ade *et al.* (2016), Calabrese *et al.* (2017)). Ele pode ser descrito pelos parâmetros cosmológicos primários: as densidades de matéria escura fria $\mathbf{\Omega_{CDM}}$ e de matéria bariônica $\mathbf{\Omega_b}$**;** a densidade de energia escura $\mathbf{\Omega_\Lambda}$; a constante de Hubble $\mathbf{H_0}$; a amplitude das flutuações de matéria, responsável pela formação das estruturas cósmicas $\boldsymbol{\sigma_8}$ e a profundidade óptica $\boldsymbol{\tau}$ na época da formação dos átomos de H e He neutros. Uma descrição atualizada dos parâmetros cosmológicos pode ser encontrada, por exemplo, em Patrigniani *et al.* (2016) e Calabrese *et al.* (2017)).

As medidas desses parâmetros vêm sendo feitas desde a década de 1990 e foram bastante refinadas com os resultados das observações dos satélites WMAP (Bennett *et al.* (2013), Planck (Ade *et al.* (2014), Ade *et al.* (2016)) e dos experimentos Atacama Cosmology Telescope – ACT (Dunkley *et al.* (2013), Hlozek *et al.* (2012), Sievers *et al.* (2013), Lindner *et al.* (2015)) e South Pole Telescope – SPT (Reichardt *et al.* (2012), Shirokoff *et al.* (2011), Story *et al.* (2013)). Elas são complementadas pelas observações das estruturas em grande escala no Universo, constituídas por aglomerados e super aglomerados de galáxias, cujas referências bibliográficas recomendadas podem ser encontradas nos sites dos levantamentos "Sloan Digital Sky Survey" (SDSS 2017), "APM Survey" (Maddox *et al.* (1990)), "2dF Survey" (2dF 2017) e "6dF Survey" (6dF 2017).

O quadro geral que emerge do modelo ΛCDM é de um Universo com cerca de 14 bilhões de anos, constituído de ~ 69% de energia escura, ~ 27% de matéria escura e ~ 4% de matéria bariônica, em expansão acelerada. Sua evolução é adequadamente descrita pela Teoria Geral da Relatividade e governada pela contribuição das componentes do tensor matéria-energia, que interagem através da força gravitacional.

As grandes estruturas hoje observadas foram formadas hierarquicamente, com estrelas interagindo gravitacionalmente para formar aglomerados estelares, em seguida galáxias e posteriormente, aglomerados de galáxias e estruturas ainda maiores.

De acordo com o modelo ΛCDM, estima-se que de poucos segundos à 20 min (~ 1000 s) após o Big Bang, a partir dos prótons e nêutrons livres, ocorreu a formação de ^{3}He, ^{4}He e uma fração de Deutério (*D*) e Lítio (*Li*), da ordem de ~ 10^{-5} e ~10^{-9} da abundância *nucleossíntese primordial* e, devido à rápida expansão e resfriamento do Universo, não foi possível produzir nenhum outro elemento mais pesado durante essa fase.

As primeiras estruturas gravitacionalmente ligadas no Universo, constituídas inicialmente de grandes nuvens de gás *H* e *He*, condensaram-se a partir do gás primordial, alguns milhões de anos após a recombinação. A formação das chamadas estrelas de População III (Pop III), com massas muito altas (até ~ 200 – 500 M_{Sol} e vida extremamente curta (< 100.000 anos) na Sequência Principal) ocorreu cerca de 100 - 200 milhões de anos após o Big Bang iniciando a produção dos elementos mais pesados que a série *Li, Be, B*, chamados genericamente, no jargão astrofísico, de "metais".

Assim, em poucas centenas de milhões de anos as explosões de gerações sucessivas de estrelas dispersaram elementos químicos mais pesados que *Li, Be, B*, enriquecendo quimicamente o meio interestelar e, consequentemente, as novas gerações de estrelas (Tielens (2013)). Alguns autores (Naoz *et al.* (2006), Loeb & Furlanetto (2013), Loeb (2014), Loeb (2016) têm uma abordagem mais radical, sugerindo, a partir de estudos teórico-computacionais, que as condições que desencadearam a formação das primeiras estrelas surgiram quando o Universo tinha cerca de 30 milhões de anos. Isso significa que as condições para produção de elementos de importância prebiótica poderia ser antecipada em, pelo menos, 70 milhões de anos.

O ciclo evolutivo das estrelas é diretamente dependente de sua massa, sendo que estrelas com massa M < 1,4 M_{Sol} vivem da ordem de alguns bilhões a alguns trilhões de anos. O intervalo de massas das chamadas estrelas de baixa massa vai de 0,08 M_{Sol}, que é o limite de massa que permite o início do ciclo de reações de fusão de *H*, até cerca de ~ 2 $M_{Sol.}$ Os objetos com massas menores que 0,08 M_{Sol} são conhecidos como *anãs marrons*. As estrelas de massa intermediária (2 < M/M_{Sol} < 8) produzem núcleos degenerados de *C*, não sendo capazes de processa-lo para formar elementos mais pesados. Somente *estrelas massivas*, com massas maiores que ~ 8 M_{Sol}, produzem os elementos químicos mais pesados que o Carbono (*C)*, sendo os principais *C,* Nitrogênio (*N*), Oxigênio (*O*), Fósforo (*P*) e Enxofre (*S*). Ao final do ciclo de reações nucleares, elas explodem como supernovas e, neste processo, produzem desde o Ferro (*Fe*), último elemento do ciclo de fusão nuclear, até o Urânio (*U*), o último elemento da tabela periódica produzido de forma natural.

A química e o metabolismo da vida, como a conhecemos, são compostos, principalmente, pelos elementos químicos *C, N*, *O*, *P* e *S*, conhecidos sob a sigla de **CHONPS**. Obviamente há outros elementos importantes para o metabolismo dos seres vivos, porém os **CHONPS** estão presentes em praticamente todas as formas de vida conhecidas, tornando-os um denominador comum. A proporção desses elementos, tanto no Sol quanto em sistemas vivos é mostrada na figura 11.1. Os elementos **CHON** circundados por círculos vermelhos, correspondem a cerca de 96% do peso corporal de um ser vivo e aproximadamente 72% da massa do Sol.

Figura 11. 1 - Tabela periódica demonstrando abundâncias de elementos químicos em porcentagem de peso corporal de organismos vivos terrestres, bem como os elementos indispensáveis ao crescimento e sobrevivência do organismo, chamados de elementos essenciais. (Adaptado de Chopra (2009)).

Essencialmente, todos os elementos químicos do *C* ao *Fe* foram produzidos por fusão nuclear ou outros processos no interior de estrelas em algum momento da evolução do Universo. Sem metais, teríamos apenas moléculas formadas por *H* e *He*, estáveis somente em condições de baixíssima temperatura, como por exemplo HeH^+ e, muito provavelmente, não haveria formação de planetas ou de vida como a conhecemos (ver, e.g., Wilson, no Handbook of Molecular Physics (2003)).

12.3. A EVOLUÇÃO QUÍMICA DO UNIVERSO

O processo de formação de moléculas no espaço é afetado por vários fatores, tais como as condições fisico-químicas do ambiente, o estado dos “reagentes” e as fontes de

energia envolvidas. Conhecer as características e propriedades do chamado Meio Interestelar (MI) é essencial para uma melhor compreensão dos processos de evolução e enriquecimento químico em ambientes astrofísicos.

12.3.1. CARACTERÍSTICAS DO MEIO INTERESTELAR

O MI corresponde a todo material existente entre as estrelas. É constituído de gás, poeira, campo de radiação (radiação eletromagnética de estrelas, galáxias e outros corpos celestes bem como fótons da Radiação Cósmica de Fundo em Microondas), raios cósmicos (constituídos de partículas elementares e núcleos atômicos) e campo magnético. O gás é a componente dominante, misturado com a poeira (100 para 1 em massa) e pode ser encontrado no estado neutro (na forma de átomos ou moléculas) e/ou ionizado.

As condições físico-químicas do MI, também chamadas fases, são bastante heterogêneas, com a temperatura e densidade do gás variando de ~ 10 a ~10^6 K e de ~10^{-4} a mais de 10^8 cm^{-3}, respectivamente. Regiões de gás e poeira com temperaturas ~10 K e densidades maiores que 10^3 cm^{-3}, comumente chamadas de nuvens moleculares, são ambientes apropriados para a formação de moléculas e poeira com mantos de gelos (ver, e.g., Caselli & Ciccarelli (2012)). Um resumo das características das diferentes fases do MI encontra-se na Tabela 11.1 e uma descrição bastante detalhada de suas propriedades e processos físicos foi feita por A. Tielens (2005).

Tabela 11.1 –Síntese das propriedades das fases do MI

Fase	Dimensões típicas (pc)	n_0[b] (cm^{-3})	T[c] (K)	Estado do gás (H)
Nuvens moleculares	80	> 200	10	molecular
Meio frio neutro	100 – 300	50	80	neutro (atômico)
Meio morno neutro (atômico)	300 – 400	0,5	8000	neutro (atômico)
Meio morno ionizado	1000	0,1	8000	ionizado
Regiões HII	70	$10^2 – 10^4$	10^4	ionizado

[a] - 1 pc = 3,086 x 10^{18} cm.
[b] - Densidade típica do gás para cada fase.
[c] - Temperatura típica do gás para cada fase.

12.3.2. FORMAÇÃO DE COMPOSTOS SIMPLES

O reprocessamento de elementos químicos em nuvens moleculares (NM), durante os inúmeros ciclos de evolução estelar, é um requisito essencial para a formação de moléculas prebióticas, que são os principais constituintes dos organismos vivos. A síntese de moléculas nas NM's ocorre por reações químicas na fase gasosa ou nos

manto que se acumulam sobre a superfície dos grãos de poeira cósmica[2]. Embora os grãos de poeira constituam apenas 1% da massa do MI, eles são bastante importantes porque propiciam a associação dos átomos de H, na sua superfície, para formar o H_2, que é o principal constituinte das NM's. Além disso, a poeira juntamente com o H_2 bloqueiam a radiação ultravioleta e visível, protegendo dessa forma, as moléculas das regiões mais internas das nuvens de serem dissociadas (ver, e.g., Hollenbach (1971), Caselli & Ciccarlli (2012)). Também favorecem a hidrogenação de algumas moléculas e a ocorrência de reações químicas que levam à formação de substâncias cada vez mais complexas, como os aminoácidos, importantes para o desenvolvimento da vida. Um conjunto representativo das reações que ocorrem no MI é apresentado na figura 11.2.

Figura 11. 2 - Representação esquemática das principais reações químicas que ocorrem nas nuvens interestelares. O simbolo PAH corresponde a Hidrocarbonetos Poli Aromaticos (Adaptado de Fraser (2002)).

---

[2] Os grãos de poeira são partículas com tamanhos da ordem de 0.1 microns, compostas por silicatos e carbonatos (moléculas formadas por Silício e Carbono ligadas ao Oxigênio).

Moléculas contendo *C* são importantes nessa discussão uma vez que o carbono é essencial para a existência da vida, e o elemento estruturante da química orgânica. Essa importância decorre das seguintes propriedades do *C*: ele é o quarto elemento mais abundante no Universo; é extremamente versátil quimicamente (comparado, p.ex., com o Silício, *Si*; possui a capacidade de realizar ligações covalentes com elementos com valência um, dois, três ou quatro; não é dissolvido ou reage com ácidos ou água; é capaz de formar cadeias muito longas (nenhum outro elemento é capaz de formar tantas ligações tão fortes), além de permitir uma grande variedade de combinações de cadeias carbônicas, o que o torna o componente primário das macromoléculas.

12.3.3. MOLÉCULAS NO MEIO INTERESTELAR E DISCOS PROTOPLANETÁRIOS

A primeira linha espectral de uma substância química observada no MI data de 1904 (Pagni (2007)) com a detecção no visível do ion de Ca^+ no sistema f-Orionis. As primeiras observações das moléculas *CN, CH* e CH^+ foram feitas por volta de 1940 e, em 1951, foi detectado *H* neutro através de uma linha de comprimento de onda de 21 cm (Ewen & Purcell (1951), Hulst (1951)), no espectro de rádio. Na década de 60 foram observadas no MI linhas espectrais das moléculas de água e amônia (Cheung *et al.* (1968), Cheung *et al.* (1969)). No entanto, foi a observação, no MI, de uma linha espectral em 115 GHz da molécula de *CO* (Wilson *et al.* (1970)) que impulsionou o estudo sobre a possibilidade de formação de moléculas orgânicas nesse meio . Desde então, as observações têm mostrado a presença de quase todos os tipos de representantes das famílias da química orgânica: hidrocarbonetos, alcoois, ácidos, aldeídos, acetaldeídos, cetonas, aminas, éteres e açúcares (Pagni (2007), Kowk (2009), Kwok (2011), Herbst & van Dishoek (2009)). Uma cronologia das observações de moléculas no MI pode ser encontrada em http://www.astrochymist.org/astrochymist_ism.htm.

Até recentemente, quase 200 moléculas foram observadas no MI ou em envoltórios circunstelares, sendo boa parte delas orgânica (contém pelo menos um -*CH*). A maior parte delas foi detectada em nuvens moleculares, onde a presença de gás denso e grãos de poeira impede a penetração da radiação UV que tende a dissociá-las (Caselli & Ciccarelli (2012)). Uma lista das moléculas já observadas no espaço, com as respectivas referências, pode ser encontrada no site https://www.astro.uni-koeln.de/cdms/molecules.

O colapso de regiões em uma nuvem molecular leva, frequentemente, à formação de glóbulos e discos, dando posteriormente origem a sistemas protoestelares. Estes sistemas, constituídos de disco protoplanetário e protoestrela contém, além da composição química original, novas moléculas formadas durante o colapso. Excelentes discussões sobre a evolução química das nuvens interestelares e sua contribuição para a

formação de discos protoplanetários podem ser encontradas nos artigos de van Dishoek (2004) e Henning & Semenov (2013).

Os estágios primordiais de formação de um sistema protoplanetário são representados na figura 11.3, com o lado direito contendo as indicações da distribuição de temperatura dentro do disco, locais de formação de moléculas complexas, bem como as regiões onde se encontram íons e radicais, em função da distância à protoestrela central. No lado esquerdo são indicadas as regiões de formação dos planetas gigantes, a região de transporte turbulento de matéria para o centro do disco e a região de deposição das partículas de poeira e mantos de gelos. A linha azul, denominada linha de gelo, corresponde à posição em que as moléculas de água e amônia formam gelos na superfície dos grãos de poeira cósmica.

Figura 11. 3 – Esquema dos estágios primordiais de formação um sistema protoplanetário (Adaptado de Henning & Semenov (2013), Caselli & Ciccarelli (2012)).

A análise do gás e poeira ejetados de cometas mostram que 30% dos grãos de poeira contidos nesses corpos celestes são dominados pelos elementos $CHONPS$. Muitas espécies químicas de importância prebiótica foram detectadas em cometas. Como exemplo, no cometa $Hyakutake$, foram observadas amônia (NH_3), metano (CH_4), acetileno (C_2H_2), acetonitrila (CH_3CN) e isocianeto de hidrogênio (HNC). No cometa $Hale - Bopp$ também se observou CH_4, C_2H_2, ácido fórmico ($HCOOH$), HCN, HNC, ácido ciânico ($HNCO$), cianoacetileno (HC_3N) e tioformaldeído (H_2CS) (Ehrenfreund & Chanrley (2000)).

A presença dessas moléculas em cometas formados no disco protoplanetário sugere que estes podem ter sido uma importante fonte de moléculas orgânicas, incluindo aminoácidos, para a Terra primitiva (Brack (2007)). Reações químicas na superfície de grãos de poeira cósmica e suas interações com a fase gasosa têm sido estudadas através de simulações numéricas considerando centenas de reações químicas. Uma descrição

detalhada do processo de simulação das reações pode ser encontrada em Aikawa *et al.* (2005), Garrod (2013). Os resultados de Garrod mostram que mantos de gelo na superfície dos grãos, sob a ação de raios cósmicos, podem ser um ambiente propício para a formação de moléculas de importância prebiótica.

A figura 11.4 mostra a evolução temporal da fração de abundância de espécies químicas selecionadas, produzidas em um modelo de nuvem interestelar em colapso, para formar um sistema protoplanetário, constituído de estrela central e disco protoplanetário. Nesse modelo, por conta do colapso, a temperatura da nuvem varia gradativamente de 20 K a 400 K, numa escala de tempo de um milhão de anos. Os gelos mais abundantes nesse ambiente são formados de água (H_2O), seguido de monóxido de carbono (CO), amônia (NH_3) e metano (CH_4). Somente a partir de 100 K é que a abundância dessas espécies no estado gasoso é maior do que no estado sólido.

Figura 11. 4 – Fração de abundância do aminoácido glicina e de várias outras espécies similares ou parentes em função do tempo. A linha sólida indica espécies na fase gasosa e as linhas pontilhadas da mesma cor indicam mantos de gelo da mesma espécie. (Adaptado de Garrod (2013b)).

Há evidências que a glicina, um dos vinte aminoácidos ligados à vida, é produzido na superfície dos grãos sob a forma de gelo quando a temperatura do meio é de 30 a 200 K (ver, e.g., Garrod (2013b))

Acima dessa temperatura ela passa ao estado gasoso. Várias outras moléculas de importância prebiótica são produzidas nas nuvens de gás e poeira cósmica da mesma maneira e, de acordo com esses resultados, espera-se que as reações na superfície dos grãos definam a abundância de glicina nas nuvens cósmicas.

A dinâmica peculiar a cada sistema e a ocorrência de processos aleatórios devem ter sido responsáveis pelas diferenças entre os sistemas planetários distintos. Acredita-se que a evolução desse sistema dinâmico caótico levou à formação da primeira forma de vida na Terra e foi capaz de mantê-la durante bilhões de anos e possibilitar sua evolução.

12.4. ZONA HABITÁVEL E HABITABILIDADE

A definição de Zona Habitável (ZH) foi introduzida em 1959 (Huang (1959)) como sendo a região ao redor de uma estrela em que o ciclo de fusão de H em He seja estável por alguns bilhões de anos, permitindo que um planeta possa manter água, no estado líquido, em sua superfície. A estrela fornece a energia e a água funciona como um solvente eficiente que participa ativamente das reações químicas.

Posteriormente foi introduzida a ideia de uma Zona Habitável Galáctica, definida como a região mais provável da vida emergir em uma galáxia (ver, e.g., Lineweaver *et al.* (2004), Ward & Brownlee (2000), Gonzalez *et al.* (2001)). Nessa região o enriquecimento químico contém abundância adequada de **CHONPS** e a quantidade de eventos catastróficos capazes de interromper o processo de formação de vida (ou sua sobrevivência) é baixa comparada com a escala de tempo evolutivo terrestre. Lineweaver e colaboradores (2004) modelaram a evolução da nossa Galáxia e identificaram como a ZHG uma região entre 7 e 9 kiloparsecs distante do centro, cujo raio varia com o tempo, composta por estrelas formadas entre 4 e 8 bilhões de anos atrás. Eles estimaram que cerca de 75% das estrelas nessa ZHG são mais velhas do que o Sol, aumentando a probabilidade de existência de vida nessa região. Nela também há baixa ocorrência de supernovas e a idade das estrelas seria suficiente para produzir o enriquecimento químico necessário à formação de planetas terrestres e à possível evolução biológica. O conceito de ZH e sua relação com a química da vida pode ser flexibilizado de forma a incluir outros solventes e, hipoteticamente, outros elementos-base para formar uma bioquímica alternativa.

Embora essa flexibilidade saia da abordagem padrão, é interessante explorar algumas possibilidades com a matéria prima disponível no Universo. Por exemplo, W. Bains (Bains (2004)) argumenta que outros fluidos podem ser abundantes em diferentes locais

do Universo e a natureza química desses fluidos como solventes poderia modelar um ambiente que favoreceria a evolução de uma bioquímica não terrestre. Outros processos químicos podem satisfazer o impulso termodinâmico para o surgimento da vida através de mecanismos alternativos, consequentemente produzindo assinaturas químicas diferentes da bioquímica terrestre.

12.4.1. HABITABILIDADE

Habitabilidade, no contexto astrofísico, é definida pelo conjunto de características que permitem um planeta rochoso abrigar vida. Isso não significa, necessariamente, que o planeta tenha que abrigar vida ou que ele apresente as características necessárias para isso. Somente podemos considerar habitabilidade do ponto de vista do sucesso na Terra, portanto dentro desse conjunto devem estar, entre outras condições: a) a presença de uma fonte de energia necessária para o metabolismo, b) os elementos químicos para formar as biomoléculas (CHONPS), c) a existência de um planeta rochoso que possa abrigar essas biomoléculas e d) um solvente para viabilizar as reações químicas (como descrito, por exemplo, em Domagal-Goldman *et al.* (2016), Kaltenegger (2017). Deve ser ressaltado que condições geofísicas e geológicas foram também essenciais para a habitabilidade na Terra, tais como a presença de campo magnético, a tectônica de placas e a presença de escudos naturais como a Lua e Júpiter. Essas condições não serão discutidas neste artigo.

Estrelas com massa muito maior do que ~ 1,5 M_{Sol} tem uma vida menor que 3 bilhões de anos, evoluindo para o estágio de anã branca após a fase de nova. Isso faz com que elas não se adequem ao item a), pois espera-se que estrelas que sejam uma fonte de energia estável para possibilitar a evolução da vida permaneçam na Sequência Principal por, pelo menos, o tempo aproximado que o Sol permanece - cerca de 10 bilhões de anos. O item b) é contemplado pela química da nuvem que dá origem aos sistemas protoplanetários, possivelmente baseada nos **CHONPS**. Ela determina a condição de habitabilidade de um determinado nicho em função da abundância, versatilidade de combinação e pelo fato de formar as estruturas fundamentais da vida como a conhecemos. Quanto mais próximo da data atual, mais enriquecido quimicamente deve ser o meio que formará o disco e, provavelmente, permitirá a formação de planetas rochosos, o que leva ao item c). Planetas rochosos apresentam a interface sólido-líquido necessária à diversidade de condições evolutivas que eventualmente surgirão. Do ponto de vista químico, a água é considerada o candidato mais adequado ao papel de solvente, atendendo ao item d). Essa escolha deve-se a diversas características, entre elas a de ser uma molécula bastante abundante no Universo, permanecer no estado líquido durante um intervalo de temperatura muito maior do que o de outros solventes e permitir um bom isolamento térmico e elétrico no meio celular e intercelular.

A descoberta sistemática de novos exoplanetas já contabiliza, na data da redação deste artigo, 3672 planetas (sendo 12 do tipo terrestre), 2752 sistemas planetários e 616 sistemas com múltiplos planetas, e tem possibilitado uma melhor compreensão, e mesmo reavaliações, do conceito de ZH, à luz da dinâmica planetária e da energética disponível em estrelas de massa menor que $\sim 1\ M_{Sol}$. Os exoplanetas do tipo terrestre encontrados permitem especular um futuro promissor para atender ao critério c) listado no parágrafo anterior. Condições muito diversas das encontradas no nosso Sistema Solar exigem uma reanálise das possibilidades de formação e estabilidade de órbitas planetárias, implicando em grande diversidade de condições atmosféricas para os exoplanetas do tipo terrestre.

Modelos evolutivos da atmosfera terrestre, considerando fatores como oceanos, desertos, vegetação e cobertura de nuvens são usados para obter as características ambientais planetárias cuja assinatura espectral possa ser usada para deduzir condições de habitabilidade ou fornecer indicações da presença de vida (ver, e.g., Kaltenegger *et al.* (2007), Kaltenegger (2017). Situações particulares que permitam a existência de água líquida fora da ZH devem consideradas, como é o caso de Europa, satélite de Júpiter, ou Encelado, satélite de Saturno onde a água é mantida líquida pelo aquecimento de seu interior devido às forças de maré. O estudo de exoplanetas é uma área em que alguns grupos no Brasil vem mantendo uma atividade regular há mais de 10 anos, em particular com forte participação do INPE e da Universidade Presbiteriana Mackenzie (Martioli (2006), Gould *et al.* (2010), Hwang *et al.* (2013), Kains *et al.* (2013), Street *et al.* (2013), Han *et al.* (2013), Almeida *et al.* (2013), Henderson *et al.* (2014), Tusnski & Valio (2014), Skowron *et al.* (2015), Valio *et al.* (2017).

Há diversos autores que consideram o Universo como um “ambiente biofílico” dentro do contexto ΛCDM, com base no argumento de que os **CHONPS** necessários para o aparecimento de compostos biológicos existem desde que o Universo tinha ~ 100 milhões de anos, conforme recentemente apresentado em Corazza (2017). Outros autores (Loeb (2014), Loeb (2016), Loeb *et al.* (2016b)) consideram que estes elementos podem ter sido produzidos quando o Universo era ainda mais jovem (com cerca de 30 milhões de anos) e sugerem um enriquecimento de *C* em estrelas de baixa massa (tipos espectrais K e M), as chamadas “CEMP stars” (Mashian & Loeb (2016)). Eles também argumentam que, a menos que a habitabilidade em torno de estrelas de baixa massa seja suprimida, a probabilidade de existência de vida, daqui a 10 trilhões de anos, será maior ao redor de estrelas com cerca de $0{,}1M_{Sol}$. Nesse contexto a habitabilidade cósmica seria possível logo depois da formação da primeira geração de estrelas, após o Big Bang, e terminaria somente cerca de 10 trilhões de anos depois, quando todas as estrelas terão esgotado seu ciclo na Sequência Principal.

Recentemente, Adams e colaboradores (Adams *et al.* (2015), Adams (2016)) analisaram a influência dos valores da constante de estrutura gravitacional (definida como $\alpha_G \equiv Gm_p^2/\hbar c$) e da constante de estrutura fina $\alpha \equiv e^2/\hbar c$, sobre as condições de habitabilidade do Universo, e concluíram que essas condições são preservadas mesmo variando os parâmetros por algumas ordens de grandeza. Análise similar foi feita considerando a influência de variações na amplitude das flutuações de densidade primordial (Q) sobre a formação de estrelas, concluindo que a habitabilidade em outros universos é mais favorável e mais diversificada do que se imaginava.

Um Universo "viável", em termos de Habitabilidade, é definido pelo intervalo de valores de G que permite a existência de reações nucleares para formar estrelas e planetas habitáveis. Apesar de Adams analizar somente duas constantes físicas, α e G, e de ser desconhecida a distribuição de probabilidades a partir da qual os possíveis universos "escolhem" os valores dessas constantes, elas podem variar de ordens de grandeza, dentro do espaço de parâmetros permitidos, e ainda permitir Universos "viáveis". Mesmo considerando-se um conjunto grande de vínculos restritivos, ainda assim o limite encontrado de $\alpha_G/\alpha \simeq 10^{-34}$ sugere que Universos habitáveis podem existir dentro uma grande hierarquia de intensidades da força gravitacional e da força eletromagnética.

12.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A VIDA

Uma definição operacional ou uma teoria que descreva o fenômeno da vida é essencial para a distinção de formas de vida diferentes das observadas na Terra. Particularmente, a importância cresce à medida que novas missões para estudar corpos do sistema solar em busca de evidências de vida são propostas pelas agências espaciais de todo o mundo. Cleland e Chyba (2002 evidenciam essa importância: *"À medida que a ciência progride na compreensão da origem da vida na Terra (...) e com a atenção concentrando-se na astrobiologia e na busca pela vida em Marte e em Europa, lua de Júpiter, aumenta a necessidade de uma definição geral de vida"*.

Até o momento, não há uma definição que seja aceita pela comunidade ligada à Astrobiologia, independentemente do foco da disciplina envolvida (Trifonov (2012)), e a dificuldade é objeto de estudo de vários programas em andamento no mundo todo. Discussões mais detalhadas sobre as dificuldades dessa definição e as implicações que ela traria à comunidade podem ser encontradas, e.g., em Bedau & Cleland (2010),; Benner (2010). Não havendo uma teoria geral sobre a natureza de sistemas vivos, nenhuma das definições de vida fornece uma resposta satisfatória. Assim, é recomendável utilizar uma abordagem científica cautelosa e ao mesmo tempo flexível,

que auxilie sua identificação minimizando as chances de excluir outros sistemas vivos muito diferentes dos existentes na Terra. Algumas características parecem ser comuns a praticamente todos os sistemas vivos conhecidos e tem sido alvo de estudos durante as últimas décadas para sua melhor determinação, como descrito por Szostak e colaboradores (2002).

Como exemplo, Koshland (2002) propõe que sejam utilizados princípios termodinâmicos e cinéticos essenciais para que um sistema vivo, tal como o conhecemos, possa existir. Eles foram denominados "pilares da vida" e agrupados sob o acrônimo PICERAS, que significa: Programa; Improvisação; Compartimentalização; Energia; Regeneração; Adaptabilidade; e Isolamento Seclusion. Ainda assim, nem sempre o que é vivo apresenta todos essas características e nem sempre todos elas correspondem a algo vivo.

No Programa da NASA de Estudos dos Limites da Vida Orgânica em Sistemas Planetários (Hays (2015)) foram adotadas as seguintes características para tentar caracterizar um sistema vivo, a saber: ausência de equilíbrio termodinâmico; dependência da manutenção da taxa de variação da entropia (com valores negativos indicando o aumento de organização); manutenção de seu estado organizado, aumentando a entropia da vizinhança; presença de metabolismo, complexidade e organização; a existência de mecanismos de reprodução; e capacidade de desenvolvimento, evolução e autonomia. Essas características são responsáveis pelas funções básicas observadas nos sistemas vivos terrestres: adquirir energia do meio e convertê-la para a forma química; possuir uma rede de reações químicas, envolvendo os *building~blocks* em solvente apropriado, que sintetizam os compostos necessários para manutenção, crescimento e auto-replicação; e utilização de compostos químicos capazes de armazenar grandes quantidades de informação para que o sistema tenha condições de se auto-replicar e auto-perpetuar.

12.5.1. DOS ÁTOMOS AOS SISTEMAS VIVOS

Desde o início do Universo, a matéria tem evoluído na direção de formas mais complexas. Nos instantes iniciais foram produzidos H e He e posteriormente, outros elementos emergiram em decorrência da evolução das estrelas. Apesar de terem sido formados mais de 100 elementos químicos, os elementos C, H, O e N compõem boa parte dos compostos químicos observados no Universo, devido à facilidade com que elas formam ligações covalentes, produzindo uma grande variedade de moléculas no meio interestelar.

As primeiras moléculas orgânicas formadas continham um pequeno número de átomos, mas tinham a capacidade de formar compostos diferentes através de várias reações. As

transformações de ácido cianídrico (HCN) em cianoacetileno (HC_3N) e cianamida (CH_2N_2) e daí em aminoácidos e bases nucleicas é semelhante à transformação de formaldeído (CH_2O) em açúcar. O experimento de S. Miller mostrou que uma atmosfera contendo as moléculas CH_4, NH_3, H_2 e vapor d'água, submetida a descargas elétricas formam glicina, α −alanina e β −alanina (Miller (1953)). Experimentos posteriores realizados por S. Fox (1958, 1972) mostraram que o fluxo de CH_4 através de uma solução concentrada de NH_4OH incidindo sobre uma superfície similar à lava vulcânica ou sílica, com temperatura de $1000°$ C levou à formação de 12 aminoácidos (acido aspártico, acido glutâmico, glicina, alanina, valina, leucina, isoleucina, serina, treonina, prolina, tirosina e fenilalanina), potenciais percussores do RNA (Bada (2004), Powner (2009), Hud (2013)).

As análises de amostras obtidas em experimentos similares (Parker *et al.* (2011)), com uma mistura de CH_4, H_2S, NH_3, e CO_2, mostraram a formação de 23 aminoácidos e 4 aminas, incluindo 7 compostos organosulfurados. As abundâncias medidas nesse experimento são compatíveis com medidas em alguns meteoritos do tipo condritos carbonáceos. De acordo com Parker, os resultados sugerem que a mistura de gases, incluindo H_2S, deve ter ajudado na síntese de aminoácidos e aminas na Terra primitiva e durante o processo de formação do Sistema Solar. Já o ambiente contendo H_2S utilizado por Miller em seu experimento parece não ter sido comum na Terra primitiva, embora fosse possível encontra-lo próximo a vulcões.

Apesar dos organismos celulares possuírem sofisticada capacidade metabólica, a origem de sua rede de reações é pouco conhecida (Luisi (2012)). A estrutura central das redes metabólicas é similar em todos os organismos conhecidos estudados (Jeong et al. (2000), Braakman & Smith (2013)) levando a crer que estes mecanismos surgiram nos primórdios da evolução celular. Uma hipótese sobre a origem do metabolismo é que as redes de reação estabeleceram-se na Terra prebiótica como consequência do ambiente físico e químico do local onde a vida emergiu pela primeira vez, reforçando a hipótese de Bains (Bains (2004)) de que o solvente disponível molda a química necessária à vida. Com base nesses argumentos, pode-se imaginar que a sequência de reações químicas principais no metabolismo atual (glicólise e reações pentoses-fosfato) deve ser muito semelhante à do primeiro organismo vivo (Braakman & Smith (2013), Shapiro (2000), Huber *et al.* (2002)).

De acordo com Keller e colaboradores (Keller *et al.* (2014)) a sequência de reações que constituem o metabolismo central do C poderia ser restringida pelo ambiente do oceano rico em ferro do Arqueano, indicando que os primeiros processos metabólicos poderiam ter se originado no mundo prebiótico. Esses resultados sugerem que compostos prebióticos complexos, como aminoácidos e $proteinóides$, poderiam fazer parte de

uma rede complexa de reações químicas alimentada pela energética presente na atmosfera primitiva da Terra, levando à formação de proteínas e ao conjunto de reações que compõem o metabolismo central das células atuais.

A possibilidade de que essa química pode ter começado na nuvem protoestelar fica evidente nas observações atuais de moléculas complexas nas nuvens de gás e poeira no meio interestelar, como mostrado nas seções 3.2 e 3.3, e na composição química dos meteoritos condritos carbonáceos, como o meteorito de Murchison (P. Schmitt-Kopplin *et al.* (2012)). Dessas moléculas são formados os vinte aminoácidos, cinco bases nucleicas (nucleobases), dois açucares, glicerol, um aminoálcool (colina) e um ácido graxo (ácido palmítico) necessários para formar um sistema vivo (Olomucki (1993)).

A transição de sistemas não-vivos → vivos a partir de processos físico-químicos ainda é desconhecida e provavelmente ocorreu em sistemas muito pouco autopoiéticos[3] e fora da homeostase[4]. Mesmo que essa transição tenha ocorrido mais de uma vez, ou muitas vezes, devido às alterações ambientais extremas que ocorreram na Terra jovem, em algum momento ela se estabeleceu definitivamente, dando origem às formas de vida observadas hoje. Elas tem relação direta com as condições de habitabilidade no disco protoplanetário e, mais remotamente, com as condições biofílicas geradas após o surgimento das primeiras estrelas. Novamente, usando a argumentação acima e a visão proposta por Bains (2004), diferentes condições de habitabilidade, particularmente "locais", derivadas da formação do disco protoplanetário, podem, eventualmente, dar origem a formas de vida distintas da que conhecemos, caso elas sejam capazes de emergir dos processos físico-químicos locais.

12.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo ΛCDM é o melhor cenário para descrever a formação das primeiras estruturas do Universo e indica que os elementos fundamentais à vida ($\boldsymbol{CHONPS}$) foram criados no Universo por volta de 100 milhões de anos. Em decorrência da expansão, resfriamento e interação gravitacional, as flutuações primordiais de densidade de matéria condensaram-se, formando imensas nuvens de gás, possibilitando a formação das primeiras estrelas, o início do processo de enriquecimento químico do Universo e a subsequente formação de poeira e moléculas complexas. Observações astronômicas, aliadas a simulações numéricas da química do meio interestelar, indicam que moléculas orgânicas complexas foram criadas em nuvens moleculares e sugerem que os compostos

[3] autopoiético - capaz de reproduzir a si próprio

[4] homeostase - capacidade do organismo vivo de apresentar uma situação físico-química característica e constante, dentro de determinados limites, mesmo diante de alterações impostas pelo meio ambiente.

necessários ao surgimento da vida, como a conhecemos, estão disponíveis e espalhados no Universo há vários bilhões de anos. Entretanto, o passo para formar o primeiro sistema vivo a partir de um conjunto de moléculas complexas ainda é desconhecido.

A combinação das condições de habitabilidade apresentadas na seção 4 permitiram que a Terra abrigasse um primeiro sistema vivo (ou diversos?) que conseguiu sobreviver e evoluir, tanto no aspecto de complexidade, no caso dos eucariontes, quanto no aspecto de adaptabilidade, no caso de bactérias e arqueobactérias. Há diversas evidências geológicas e geofísicas no sentido de que estes foram os passos para o surgimento e evolução da vida na Terra. Embora a compreensão do(s) mecanismo(s) de transição de um sistema não-vivo para vivo a partir de processos físico-químicos locais seja um tema bastante desafiador, um dos principais pontos deste artigo é argumentar que as condições fisico-químicas necessárias (e, talvez, suficientes) para o aparecimento da vida, tal como a conhecemos, são comuns e remontam à formação das primeiras estrelas e ao enriquecimento químico do Universo como um todo.

É perfeitamente aceitável especular que a química da vida não seja necessariamente baseada em C e H_2O, porém outras possibilidades dependem do mesmo processo de enriquecimento químico universal. Mesmo que o Si seja menos abundante e menos versátil quimicamente, e que os solventes mencionados na subseção 4.1 sejam menos versáteis, do ponto de vista termodinâmico, a enorme quantidade de exoplanetas encontrados até o momento e a escala de tempo evolutivo de outros sistemas planetários, em comparação com o Sistema Solar, permite aceitar que as condições consideradas como prebióticas na Terra existam em vários outros pontos do Universo.

Por fim, é importante destacar que este artigo resultou das discussões ocorridas durante a disciplina "Fundamentos de Astrobiologia", ministrada no programa de pós-graduação em Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 2016 e é parte do esforço de alguns dos autores em oferecer um enfoque “astrobiológico” a determinados projetos de pesquisa ligados ao programa.

Por fim, é importante destacar que este artigo resultou das discussões ocorridas durante a disciplina "Fundamentos de Astrobiologia", ministrada no programa de pós-graduação em Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 2016 e é parte do esforço de alguns dos autores em oferecer um enfoque “astrobiológico” a determinados projetos de pesquisa ligados ao programa.

12.7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o revisor deste artigo pelos comentários e sugestões que melhoraram significativamente a redação do manuscrito, e também ao Dr. Isaac Joukhadar pelas incontáveis horas de discussão durante a seção sobre a definição de vida.

12.8. REFERÊNCIAS

[1] G.F. Smoot, C.L. Bennett, A. Kogut, E.L. Wright, J. Aymon, N.W. Boggess, E.S. Cheng, G. de Amici, S. Gulkis, M.G. Hauser et al., Astrophys. J. 396, L1 (1992).

[2] C.L. Bennett, A. Kogut, G. Hinshaw, A.J. Banday, E.L. Wright, K. Gorski, D.T. Wilkinson, R. Weiss, G.F. Smoot, S.S. Meyer et al., Astrophys. J. 436, 423 (1994).

[3] C.L. Bennett, R.S. Hill, G. Hinshaw, M.R. Nolta, N. Odegard, L. Page, D.N. Spergel, J.L. Weiland, E.L. Wright, M. Halpern et al., Astrophys.J. 148, 97 (2003).

[4] C.L. Bennett, D. Larson, J.L. Weiland, N. Jarosik, G. Hinshaw, N. Odegard, K.M. Smith, R.S. Hill, B. Gold, M. Halpern et al., Astrophys. J. Suppl. 208, 20 (2013).

[5] P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, M. Ashdown, F. Atrio-Barandela, J. Aumont, C. Baccigalupi, A.J. Banday, R.B. Barreiro et al., Astron. Astrophys 571, A16 (2014).

[6] P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A.J. Banday, R.B. Barreiro, J.G. Bartlett, N. Bartolo et al., Astron. Astrophys. 594, A13 (2016).

[7] C. Patrignani, K. Agashe, G. Aielli, C. Amsler, M. Antonelli, D.M. Asner, H. Baer, S. Banerjee, R.M. Barnett, T. Basaglia et al., Chinese Physics C. 40, 100001 (2016).

[8] A. Loeb, International Journal of Astrobiology 13, 337 (2014).

[9] A. Loeb, ArXiv:1606.08926 (2016).

[10] S. Naoz, S. Noter e R. Barkana, Mon. Not. R. Astron. Soc. 373, L98 (2006).

[11] K. Nomoto, C. Kobayashi e N. Tominaga, Ann. Rev. Astron. Astrophys 51, 457 (2013).

[12] U. Maio e E. Tescari, Mon. Not. R. Astron. Soc. 453, 3798 (2015).

[13] G. Kulkarni, J.F. Hennawi, E. Rollinde e E. Vangioni, Astrophys. J. 787, 64 (2014).

[14] A. Tielens, The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).

[15] E. Herbst e E.F. van Dishoeck, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 47, 427 (2009).

[16] R.T. Garrod, Astrophys. J. 765, 60 (2013).

[17] P. Caselli e C. Ceccarelli, The Astron. Astrophys. Rev. 20, 56 (2012).

[18] P. Ehrenfreund e S.B. Charnley, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 38, 427 (2000).

[19] E.F. van Dishoeck e G.A. Blake, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 36, 317 (1998).

[20] S.R. Taylor, Solar System Evolution: a New Perspective (Cambrige University Press, Cambridge, 2005).

[21] A.N. Youdin e S.J. Kenyon From Disks to Planets (Springer Netherlands, Dordrecht, 2013).

[22] J.P. Williams e L.A. Cieza, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 49, 67 (2011).

[23] M. Olomucki, The Chemistry of Life (McGraw-Hill, Poughkeepsie, 1993).

[24] H. Cottin, J.M. Kotler, K. Bartik, H.J. CleavesII, C.S. Cockell, J.P.P. de Vera, P. Ehrenfreund, S. Leuko, I.L.T. Kate, Z. Martins et al., Space Science Reviews 209, 1 (2015).

[25] C.M.D. Santos, L.P. Alabi, A.C.S. Fria¸ca e D. Galante, International Journal of Astrobiology 15, 251 (2016).

[26] G. Horneck, N. Walter, F. Westall , J.L Grenfell, W.F. Martin, F. Gomez, S. Leuko, N. Lee, S. Onofri, K. Tsiganis et al., Astrobiology 16, 201 (2016).

[27] J. Quillfedt, Caderno Brasileiro de Ensino de F´ısica 27, 685 (2010).

[28] A.D. Neto, Caderno Brasileiro de Ensino de F´ısica 27, 641 (2010).

[29] I.G. Paulino-Lima e C.A.S. Lage, Boletim da Sociedade Astronˆomica Brasileira 29, 14 (2010).

[30] J.A.F. Pacheco, Revista Ciˆencia Hoje 318, 35 (2014).

[31] G. Zubay, Origins of life on the Earth and in the Cosmos (Academic Press, San Diego, 2000).

[32] J. Lunine, Astrobiology: a multi-disciplinary approach (Pearson Addison Wesley, Boston, 2004).

[33] A. Shaw, Astrochemistry: From Astronomy to Astrobiology (John Wiley & Sons, Hoboken, 2006).

[34] G. Horneck e P. Rettberg, Complete Course in Astrobiology (John Wiley & Sons, Hoboken, 2008).

[35] C. Cockell Astrobiology: understanding life in the cosmos (Wiley-Blackwell, Londres, 2015).

[36] A. Longstaff, Astrobiology: An Introduction (CRC Press, Fl´orida, 2015).

[37] D. Galante, E.P. da Silva, F. Rodrigues, J.E. Horvath e M.G.B. de Avellar, Astrobiologia: uma ciˆencia emergente (Tikinet, S˜ao Paulo, 2016).

[38] E. Calabrese, R.A. Hloˇzek, J.R. Bond, M.J. Devlin, J. Dunkley, M. Halpern, A.D. Hincks, K.D. Irwin, A. Kosowsky, K. Moodley et al., Phys. Rev. D. 95, 063525 (2017). [39] J. Dunkley, E. Calabrese, J. Sievers, G.E. Addison, N. Battaglia, E.S. Battistelli, J.R. Bond, S. Das, M.J. Devlin, R. D¨unner et al., J. Cosmol. Astropart. Phys. 2013, 025 (2013).

[40] R. Hlozek, J. Dunkley, G. Addison, J.W. Appel, J.R. Bond, C.S. Carvalho, S. Das, M.J. Devlin, R. D¨unner, T.Essinger-Hileman et al., Astrophys. J. 749, 90 (2012).

[41] J.L. Sievers, R.A. Hlozek, M.R. Nolta, V. Acquaviva, G.E. Addison, P.A.R. Ade, P. Aguirre, M. Amiri, J.W. Appel, L.F. Barrientos et al., J. Cosmol. Astropart. Phys. 10, 060 (2013).

[42] R.R. Lindner, P. Aguirre, A.J. Baker, J.R. Bond, D. Crichton, M.J. Devlin, T. Essinger-Hileman, P. Gallardo, M.B. Gralla, M. Hilton et al., Astrophys. J. 803, 79 (2015).

[43] C.L. Reichardt, L. Shaw, O. Zahn, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang, H.M. Cho, T.M. Crawford et al., Astrophys. J. 755, 70 (2012).

[44] E. Shirokoff, C.L. Reichardt, L. Shaw, M. Millea, P.A.R. Ade, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang et al., Astrophys. J. 736, 61 (2011).

[45] K.T. Story, C.L. Reichardt, Z. Hou, R. Keisler, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang, H.M. Cho et al., Astrophys. J. 779, 86 (2013).

[46] http://www.sdss.org/collaboration/citing-sdss/, acessado em 09/07/2017.

[47] S.J. Maddox, G. Efstathiou, W.J. Sutherland e J. Loveday, Mon. Not. R. Astron. Soc. 243, 692 (1990).

[48] http://www.2dfgrs.net/, acessado em 09/07/2017.

[49] http://www.6dfgrs.net/, acessado em 09/07/2017.

[50] A.G.G.M. Tielens, Rev. Mod. Phys. 85, 1021 (2013). [51] A. Loeb e S. Furlanetto, The First Galaxies in the Universe. (Princeton University Press, Princeton, 2013).

[52] S. Wilson, P.F. Bernath e R. McWeeny's, Handbook of Molecular Physics and Quantum Chemistry, 3 Volume Set (Wiley, Bognor Regis, 2003).

[53] W. Short e I. Cairns, in Proceedings from 8th Australian Space Science Conference (National Space Society of Australia Ltd, Sydney, 2009).

[54] D. Hollenbach e E.E. Salpeter, Astrophys. J. 163, 155 (1971).

[55] R. Pagni, Journal of Chemical Education 84, 233 (2007).

[56] H.I. Ewen e E.M. Purcell, Nature 168, 356 (1951).

[57] H.C. van de Hulst, Astron. J. 56, 144 (1951).

[58] A.C. Cheung, D.M. Rank, C.H. Townes, D.D. Thornton e W.J. Welch, Physical Review Letters 21, 1701 (1968).

[59] A.C. Cheung, D.M. Rank, C.H. Townes, D.D. Thornton e W.J. Welch, Nature 221, 626 (1969).

[60] R.W. Wilson, K.B. Jefferts e A.A. Penzias, Astrophys. J. Lett. 161, L43 (1970). [61] S. Kwok, Astrophys. Space Science 319, 5 (2009).

[62] S. Kwok, Organic Matter in the Universe (Wiley, Weinheim, 2011).

[63] E. Van Dishoek, Ann. Rev. Astron. Astrophys 42, 119167 (2004).

[64] T. Henning e D. Semenov, Chemical Reviews 113, 9016 (2013).

[65] A. Brack, Chemistry & Biodiversity 4, 665 (2007).

[66] Y. Aikawa, E. Herbst, H. Roberts e P. Caselli, Astrophys. J. 620, 330 (2005).

[67] R.T. Garrod, Astrophys. J. 778, 158 (2013).

[68] S.S. Huang, Publ. of the Astr. Soc. of the Pacific 71, 421 (1959).

[69] C.H. Lineweaver, Y. Fenner e B.K. Gibson, Science 303, 59 (2004).

[70] P. Ward e D. Brownlee, S´os no Universo? Porque a vida inteligente ´e imposs´ıvel fora do planeta Terra. (Campus, S˜ao Paulo, 2000).

[71] G. Gonzalez, D. Brownlee e P. Ward, Icarus 152, 185 (2001).

[72] W. Bains, Astrobiology 4, 137 (2004).

[73] S.D. Domagal-Goldman, K.E. Wright, K. Adamala, L.A. de la Rubia, J. Bond, L.R. Dartnell, A.D. Goldman, K. Lynch, M.E. Naud, I.G. Paulino-Lima et al., Astrobiology 16, 561 (2016).

[74] L. Kaltenegger, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 55, 433 (2017).

[75] L. Kaltenegger, W.A. Traub e K.W. Jucks, Astrophys. J. 658, 598 (2007).

[76] E. Martioli, Exoplanetas: o que s˜ao e como detect´a-los.. Disserta¸c˜ao de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, S˜ao Jos´e dos Campos (2006).

[77] A. Gould, S. Dong, B.S. Gaudi, A. Udalski, I.A. Bond, J. Greenhill, R.A. Street, M. Dominik, T. Sumi, M.K. Szyma´nski et al., Astrophys. J. 720, 1073 (2010).

[78] K.H. Hwang, J.Y. Choi, I.A. Bond, T. Sumi, C. Han, B.S. Gaudi, A. Gould, V. Bozza, J.P. Beaulieu, Y. Tsapras et al., Astrophys. J. 778, 55 (2013).

[79] N. Kains, R.A. Street, J.Y. Choi, C. Han, A. Udalski, L.A. Almeida, F. Jablonski, P.J. Tristram, U.G. Jørgensen, M.K. Szyma´nski et al., Astron. Astrophys. 552, A70 (2013).

[80] R.A. Street, J.Y. Choi, Y. Tsapras, C. Han, K. Furusawa, M. Hundertmark, A. Gould, T. Sumi, I.A. Bond, D. Wouters et al., Astrophys. J. 763, 67 (2013).

[81] C. Han, A. Udalski, J.Y. Choi, J.C. Yee, A. Gould, G. Christie, T.G. Tan, M.K. Szymanski, M. Kubiak, I. Soszynski et al., Astrophys. J. Lett. 762, L28 (2013).

[82] L.A. Almeida, F. Jablonski e C.V. Rodrigues, Astrophys. J. 766, 11 (2013).

[83] C.B. Henderson, H. Park, T. Sumi, A. Udalski, A. Gould, Y. Tsapras, C. Han, B.S. Gaudi, V. Bozza, F. Abe et al., Astrophys. J. 794, 7 (2014).

[84] L.R.M. Tusnski e A. Valio, in Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets, editado por N. Haghighipour, (Cambridge University Press, Cambridge, 2014).

[85] J. Skowron, I.G. Shin, A. Udalski, C. Han, T. Sumi, Y. Shvartzvald, A. Gould, D. Dominis Prester, R.A. Street, U.G. Jørgensen et al., Astrophys. J. 804, 33 (2015).

[86] A. Valio, R. Estrela, Y. Netto, J.P. Bravo e J.R. de Medeiros, Astrophys. J. 835, 294 (2017).

[87] L.C. Corazza, The Role of Population II and III Stars in the Cosmic Chemical Evolution. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, S˜ao Jos´e dos Campos (2017).

[88] A. Loeb, R.A. Batista e D. Sloan, J. Cosmol. Astropart. Phys. 8, 040 (2016).

[89] N. Mashian e A. Loeb, Mon. Not. R. Astron. Soc. 460, 2482 (2016).

[90] F.C. Adams, K.R. Coppess e A.M. Bloch, J. Cosmol. Astropart. Phys. 9, 030 (2015).

[91] F.C. Adams, J. Cosmol. Astropart. Phys. 02, 042 (2016).

[92] C.E. Cleland e C.F. Chyba, Orig. Life Evol. Biosph. 32, 387 (2002).

[93] E.N. Trifonov, Journal of Biomolecular Structure and Dynamics 29, 647 (2012).

[94] M.A. Bedau e C.E. Cleland, The Nature of Life (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).
[95] S. Benner, Astrobiology 10, 1021 (2010).

[96] J.W. Szostak, J.C. Wheeler, S.A. Benner, J.A. Berry, R. Blake, W.M. Calvin, M.J. Daly, K.H. Freeman, J.P. Gogarten, J.F. Kasting et al., The Astrophysical Context of Life (National Research Council, Washington, 2005).

[97] D.E. Koshland, Science 295, 2215 (2002).

[98] L. Hays, NASA Astrobiology Strategy (NASA, Washington, 2015).

[99] S.L. Miller, Science 117, 528 (1953).

[100] S.W. Fox e K. Dose, Molecular Evolution and the Origin of Life (W.H.Freeman & Co Ltd, San Francisco, 1972).

[101] S.W. Fox e K. Harada, Science 128, 1214 (1958).

[102] J.L. Bada, Earth and Planetary Science Letters 226, 1 (2004).

[103] M.W. Powner, B. Gerland e J.D. Sutherland, Nature 459, 239 (2009).

[104] N.V. Hud, B.J. Cafferty, R. Krishnamurthy e L.D. Williams, Chem. Biol., 20, 466 (2013).

[105] E.T. Parker, H.J. Cleaves, J.P. Dworkin, D.P. Glavin, M. Callahan, A. Aubrey, A. Lazcano e J.L. Bada, PNAS 108, 5526 (2011).

[106] P.L. Luisi, Chemistry & Biodiversity, 9, 2635 (2012).

[107] H. Jeong, B. Tombor, R. Albert, Z.N. Oltvai e A.L. Barab´asi, Nature 407, 651 (2000).

[108] R. Braakman e E. Smith, Phys Biol 10, 011001 (2013).

[109] R. Shapiro, IUBMB Life 49, 173 (2000).

[110] H. Huber, M.J. Hohn, R. Rachel, T. Fuchs, V.C. Wimmer e K.O. Stetter, Nature 417, 63 (2002).

[111] M.A. Keller, A.V. Turchyn e M. Ralser, Molecular Systems Biology 10, 725 (2014).

[112] P. Schmitt-Kopplin, Z. Gabelica, R.D. Gougeon, A. Fekete, B. Kanawati, M. Harir, I. Gebefuegi, G. Eckel e N. Hertkorn, PNAS 107, 2763 (2010).

Capítulo 12

Pesquisas em Astrofísica no INPE*

Oswaldo Duarte Miranda**

(revisado por João Braga)

* Revisado em março de 2015 e junho de 2018

** e-mails: oswaldo.miranda@inpe.br, joao.braga@inpe.br

Pesquisas em Astrofísica no INPE

12.1. INTRODUÇÃO 3

12.2. AS PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE..5

12.3. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA..6

12.3.1. INSTRUMENTOS NO SOLO..6

12.3.2. INSTRUMENTOS NO ESPAÇO..11

12.4. CONCLUSÃO..12

12.5. BIBLIOGRAFIA..13

12.1. INTRODUÇÃO

A Astrofísica estuda os objetos e as estruturas que formam o Universo em que vivemos. A Astrofísica é uma das atividades científicas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que representa de forma mais direta o nome do Instituto. Historicamente, a origem da pesquisa em Astrofísica no INPE está ligada ao desenvolvimento da Ciência Espacial no Instituto. O objetivo inicial do INPE era estudar o espaço circunvizinho à Terra, e mais tarde esse campo de estudo foi ampliado passando a abranger o espaço exterior. Para isso, houve necessidade de desenvolver instrumentos que fizessem observações do espaço, a bordo de balões, foguetes e satélites, já que a atmosfera terrestre absorve grande parte dos sinais que vêm do espaço.

As pesquisas em Astrofísica no INPE começaram na década de 1960 e continuam até hoje. As primeiras pesquisas relacionavam-se com a Astrofísica de Altas Energias, que tem como objetivo entender os mecanismos físicos responsáveis pelas emissões de raios-X e gama oriundas de objetos cósmicos como, por exemplo, pulsares, estrelas binárias, galáxias. Posteriormente, houve o desenvolvimento de estudos na área de radioastronomia, com a incorporação pelo INPE em 1980 do Rádio Observatório do Itapetinga, em Atibaia e as colaborações em radiação cósmica de fundo em microondas com universidades dos Estados Unidos. Em meados da década de 1980, iniciaram-se os estudos relacionados com as observações na faixa óptica do espectro eletromagnético, com a vinda de um grupo de pesquisadores nessa área. Na década seguinte, iniciaram-se os estudos em ondas gravitacionais.

É importante destacar que a Astrofísica nada mais faz do que estudar o meio ambiente em que a Terra está inserida. Portanto, assim como é importante conhecer os rios, as montanhas, os vales e o clima que nos cercam, também é muito importante conhecer as estrelas, planetas, galáxias e cometas. Por isso, realizar pesquisas em Astrofísica significa também conhecer o nosso meio ambiente. É conveniente lembrar que o meio ambiente é o conjunto dos fatores externos que podem influir na vida biológica, social ou cultural de um indivíduo ou grupo; o espaço externo à Terra é um dos fatores que influenciam diretamente a vida na Terra. Portanto, devemos conhecê-lo da melhor forma possível.

O Sol, que é uma estrela, é o componente da natureza que mais diretamente afeta a vida na Terra. É ele quem define o regime de temperaturas no nosso planeta. O Sol também é o responsável pelos ciclos de vida das diversas espécies da Terra, definindo, por exemplo, a fotossíntese. Pode ter também efeitos indesejáveis, como a interferência nas telecomunicações e no aumento da incidência de câncer de pele no ser humano. Dessa forma, é mais do que evidente que devemos entender muito bem como o Sol se comporta para que possamos nos precaver de possíveis problemas.

A Astrofísica pode também contribuir para a preservação da vida na Terra, seja por meio de previsão de catástrofes, como possíveis choques de cometas ou asteróides de grandes proporções com a Terra, seja por meio de estudos que possibilitem a colonização de outros planetas por seres humanos no futuro. O nosso planeta corre o risco de ser bombardeado por algum corpo que esteja vagando pelo espaço, como aconteceu no final do século passado com Júpiter, e sofrer graves consequências, entre elas a extinção da espécie humana. Existem evidências muito fortes de que no passado algo semelhante tenha ocorrido aqui na Terra e tenha provocado o desaparecimento de muitas espécies, entre elas todas as espécies de dinossauros. As pesquisas astronômicas podem ajudar na previsão de catástrofes como essas e permitir que medidas sejam tomadas com antecedência para evitá-las ou minimizá-las. Uma outra contribuição, e das mais importantes, da Astrofísica foi a de desmistificar crendices irracionais e sem fundamento científico que, infelizmente, persistem até os dias de hoje, como a astrologia.

Os estudos em Astrofísica podem trazer benefícios diretos à sociedade e fornecer dados para que problemas de outras áreas possam vir a ser resolvidos. Hoje em dia, por exemplo, a Física de Partículas, que procura entender como a matéria é formada, precisa construir aceleradores de partículas de altíssimas energias. Infelizmente, isso não é tão simples assim, já que envolve sérios problemas tecnológicos e financeiros. No entanto, o Universo está repleto de regiões onde há energia suficiente para acelerar partículas a velocidades altíssimas. Pela observação dessas regiões e dos fenômenos que lá ocorrem, pode-se aprender muito sobre as coisas que acontecem aqui na Terra.

De uma forma geral, pode-se até questionar o porquê de se investir tempo e dinheiro em pesquisas relacionadas à Astrofísica num país como o Brasil. Afinal, o Brasil não é um país no qual os recursos financeiros sejam abundantes e ainda há muita coisa que precisa ser feita no campo social. No entanto, deve-se ter em mente que um país deve tentar dominar o maior número possível de temas ligados ao conhecimento humano, já que o bem-estar de seu povo está intimamente ligado ao grau de conhecimento que o País possui. O conhecimento é a arma mais poderosa para o desenvolvimento econômico e social.

Apenas como exemplos, podem ser citados os casos de alguns produtos que foram desenvolvidos ou aperfeiçoados graças aos investimentos feitos em pesquisas em Astrofísica e que hoje rendem dividendos para os detentores dessas tecnologias: as câmaras de vídeo com base no CCD ("charge coupled device"), como as de uso profissional ou doméstico, os aparelhos de tomografia computadorizada utilizados em medicina, os sistemas de inspeção de bagagens em aeroportos com "scanners" de raios-X, vários sistemas de microondas utilizados em telefonia celular, etc. Outro exemplo de aplicação prática dos conhecimentos proporcionados pela Astrofísica está na Meteorologia, que se valeu de estudos acerca da atmosfera de planetas para melhorar os modelos sobre o comportamento da atmosfera terrestre.

Além desses exemplos, pode ser citado ainda o enorme potencial que a Astrofísica tem de tentar responder a um dos maiores anseios do ser humano, que é o de entender o Universo em que vive e saber mais sobre esse meio ambiente que o cerca. Como vimos, o estudo da Astrofísica não se resume apenas à poesia que o tema suscita, mas induz e permite a solução de vários problemas cruciais para a sociedade.

Atualmente, as pesquisas em astrofísica realizadas pelo INPE estão concentradas na Divisão de Astrofísica (DIDAS), que é uma das três divisões científicas da Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA) do INPE. O objetivo dessas pesquisas é entender os fenômenos que ocorrem no Universo de um modo geral. Busca-se conhecer as causas desses fenômenos e entender a física que governa os objetos vistos no céu, como estrelas, galáxias, quasares, buracos negros, entre outros.

Tradicionalmente, a DIDAS desenvolve pesquisas que necessitam de observações com instrumentos que ainda não estão disponíveis no Brasil, de forma a estimular o desenvolvimento de instrumentação científica no País e a formação de recursos humanos altamente qualificados. Isso se deve ao fato do INPE possuir uma boa infraestrutura para esse tipo de atividade, que normalmente não é encontrada nas universidades ou em outros centros de pesquisa brasileiros. Em particular, as atividades ligadas ao desenvolvimento instrumental espacial, com experimentos tanto em solo quanto a bordo de balões, foguetes, e satélites, têm o seu lugar natural no INPE. Como consequência direta dessa iniciativa, há o engajamento de empresas brasileiras em projetos de alto teor tecnológico agregado.

Atrelado à sua atuação técnico-científica, o INPE mantém um curso de pós-graduação, com mestrado e doutorado, em astrofísica. Os temas das dissertações e teses são ligados às pesquisas desenvolvidas na DIDAS. Também é mantido, no âmbito da CEA, um Setor de Lançamento de Balões à disposição da comunidade científica nacional e internacional para a realização de experimentos que envolvam a necessidade de utilização de balões estratosféricos.

12.2. AS PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE

Atualmente, a pesquisa na DIDAS está dividida em seis linhas, embora essa divisão seja permeada pela atuação e interação de pesquisadores em diferentes linhas. As linhas de pesquisa são: Astrofísica de Ondas Gravitacionais, Cosmologia, Astrofísica de Altas Energias, Radiofísica, Heliofísica e Astrofísica Óptica e no Infravermelho. Essas linhas contam com a participação, além dos pesquisadores da DIDAS, de estudantes de pós-graduação (mestrado e doutorado), de iniciação científica, bolsistas de pós-doutoramento e pesquisadores visitantes.

Dentro das áreas de atuação das seis linhas de pesquisa supramencionadas são feitos os seguintes estudos: estudos teóricos e observacionais em Astrofísica Estelar, Astrofísica Extragaláctica, Cosmologia e Planetas Extra-Solares. É estudada a Radiação Cósmica de Fundo em Microondas, bem como fontes

cósmicas de radiação-X e gama. São estudados o Sol, as explosões solares e seus efeitos de propagação no meio interplanetário, as relações solares-terrestres e como essas atividades afetam o clima espacial. É estudado o Universo através do seu espectro de ondas gravitacionais. Para isso encontra-se em operação, e em fase de aperfeiçoamento, o primeiro Observatório de Ondas Gravitacionais do Brasil. São estudados através de ondas de rádio objetos como: quasares, galáxias, estrelas e regiões de formação de estrelas, tanto no contínuo, quanto em linhas espectrais.

12.3. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

A pesquisa em Astrofísica visa entender a origem, evolução e destino do Universo e de seus componentes. Para isso é necessário obter dados ao longo de todo o espectro eletromagnético e mesmo fora dele, quando consideramos as ondas gravitacionais e as partículas de origem cósmica. Dessa forma, são utilizados instrumentos que operam no solo, como telescópios ópticos e radiotelescópios, e instrumentos no espaço, tais como telescópios e experimentos embarcados em balões, foguetes e satélites. Os pesquisadores da DIDAS utilizam-se praticamente de todo o arsenal de instrumentação disponível hoje em dia para coletar os dados relevantes para suas pesquisas.

12.3.1. INSTRUMENTOS NO SOLO

A DIDAS tem tido participação importante no desenvolvimento de novos instrumentos para uso com os telescópios do Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC). Tal foi o caso da primeira câmara CCD criogênica, em 1987, no desenvolvimento do fotômetro rápido FOTRAP, no desenvolvimento do fotômetro rápido CCD e no projeto da Câmara Infravermelha (CamIV). Atualmente, em desenvolvimento, encontra-se o instrumento SPARC-4 (*Simultaneous Polarimeter and Rapid Camara in Four Bands*) que, como o nome sugere, reúne características de uma câmara fotométrica multi-banda com capacidades polarimétricas (Figura 1). Esse futuro instrumento será utilizado no telescópio "*Perkin Elmer*" do LNA. A DIDAS também esteve envolvida no desenvolvimento de instrumentação para o telescópio SOAR (*Southern Astrophysical Research*). O SOAR é um telescópio com espelho primário de 4,1 m de diâmetro e está localizado em Cerro Pachon (Chile).

Figura 1: Esquema do instrumento SPARC-4 em desenvolvimento na DAS/INPE.

Atualmente, a DIDAS é responsável pela operação do Rádio-Observatório do Itapetinga (ROI), situado numa área de 3 alqueires dentro do município de Atibaia (SP). Esse é o local onde se encontra a maior antena destinada à radioastronomia no Brasil. Em funcionamento desde o início da década de 1970, o ROI está à disposição de toda a comunidade científica nacional. Possui uma antena de 13,7 m de diâmetro capaz de receber sinais de frequências entre 1 e 150 GHz (Figura 2). São realizadas várias pesquisas astronômicas, incluindo as relacionadas a física solar, formação de estrelas, astronomia galáctica e extragaláctica.

Outro instrumento em operação pela DIDAS é o Espectrógrafo Solar Brasileiro (em inglês, *Brazilian Solar Spectroscope* – BSS), que opera com uma antena de 9 m de diâmetro, instalado atualmente na unidade do INPE em Cachoeira Paulista (SP). Esse instrumento é dedicado à observação, e

visualização em tempo real, da atividade solar em ondas de rádio decimétricas (1.000 – 2.500 MHz). A emissão rádio nessas frequências é proveniente de uma região onde ocorre a aceleração das partículas que geram as explosões solares. Esse instrumento faz parte da rede de coleta de dados do Programa de Clima Espacial do INPE (EMBRACE).

Figura 2: O Rádio Observatório de Itapetinga (ROI)

Figura 2: Rádio-Observatório do Itapetinga (ROI) em Atibaia.

Em fevereiro de 2015 foi concluída a fase II de desenvolvimento do primeiro Interferômetro Decimétrico Brasileiro (em inglês *Brazilian Decimetric Array* – BDA) que, na sua configuração final, consistirá de trinta e oito antenas de 4 m de diâmetro. O projeto BDA, fruto de colaboração entre pesquisadores da DIDAS e instituições da Índia e Estados Unidos, é otimizado para fazer vários mapas bidimensionais do Sol nas frequências de 1,2 GHz a 1,7 GHz; 2,8 GHz e 5,6 GHz a cada segundo, com resolução de até 0,7 x 1,1 minuto de arco.

O BDA será usado para estudar questões fundamentais da física solar, além de realizar investigações científicas que envolvam fontes astrofísicas galácticas e extra-galácticas. Também integrará a rede de coleta de dados do programa de Clima Espacial do INPE. A Figura 3 mostra a disposição do BDA em março de 2015 e esse interferômetro encontra-se operando na unidade do INPE em Cachoeira Paulista (SP).

Figura 3: A disposição do arranjo central do Interferômetro Decimétrico Brasileiro (BDA) em sua fase II.

O radiotelescópio GEM (do inglês *Galactic Emission Mapping* – Mapeamento da Emissão Galáctica) é fruto de projeto desenvolvido em uma colaboração internacional envolvendo pesquisadores da DIDAS, Estados Unidos, Itália e Colômbia. Trata-se de uma antena de 5,5 m de diâmetro (Figura 4) capaz de operar com receptores rádio em cinco frequências: 408 MHz; 1,465 GHz; 2,3 GHz; 5 GHz e 10 GHz . O objetivo é fazer um levantamento, em forma de mapas, de todo céu nas frequências mencionadas. Esses mapas são importantes para a limpeza de emissões contaminantes em mapas da radiação cósmica de fundo e já estão sendo utilizados para esse fim por pesquisadores da DAS e de instituições parceiras. Atualmente, o GEM opera na frequência de 5 GHz e possui capacidade de medir a polarização da emissão Galáctica. Para minimizar o ruído proveniente do sistema detector, foi desenvolvido um refrigerador que permite ao GEM operar a temperatura de 77 K. Esse instrumento também está instalado na unidade do INPE em Cachoeira Paulista (SP).

Figura 4: O Radiotelescópio GEM ("Galactic Emission Mapping")

Figura 4: O radiotelescópio GEM instalado em Cachoeira Paulista (SP).

Outro projeto em desenvolvimento pela DAS é o Observatório de Ondas Gravitacionais Mário Schenberg – Projeto Gráviton (Figura 5). Esse projeto é um esforço de cientistas brasileiros de diversas instituições (DAS/INPE, USP, UNICAMP, ITA, entre outras) para construir uma antena gravitacional ressonante capaz de observar sinais gravitacionais oriundos de fontes astrofísicas. A primeira detecção de ondas gravitacionais terá um impacto extraordinário na pesquisa em Astrofísica, não só porque confirmará uma previsão fundamental da Teoria da Relatividade Geral e testará várias teorias de gravitação, mas também porque representará a abertura de uma nova janela astronômica para estudo do Universo, permitindo observar fenômenos que seriam impossíveis de ser observados no espectro eletromagnético. A antena Schenberg consiste numa esfera maciça com 65 cm de diâmetro, feita de uma liga de cobre-alumínio e com massa da ordem de 1.150 kg. O telessensor será capaz de converter a energia das ondas gravitacionais em impulsos elétricos que serão amplificados por dispositivos supercondutores. Após a digitalização, os dados serão analisados computacionalmente. Para minimizar ruídos externos o detector terá que ser mantido sob alto vácuo e refrigerado a temperaturas ultracriogências da ordem de 0,02 K (ou -273,14 ºC)

Figura 5: Esquema da antena detectora de ondas gravitacionais Schenberg.

12.3.2. INSTRUMENTOS NO ESPAÇO

Além dos instrumentos citados acima, que se configuram como instrumentos de solo, a DIDAS tem desenvolvido instrumentos para operar no espaço. Em particular, o Projeto MASCO teve como objetivo construir um telescópio capaz de produzir imagens em raios X e gama de várias regiões do Universo. As emissões cósmicas nessas faixas de frequências só podem ser observadas a grandes altitudes, por causa da absorção da atmosfera terrestre. Para realizar essas observações, o telescópio foi colocado a bordo de uma plataforma estabilizada suspensa por balão estratosférico inflado por hidrogênio e realizou as observações a 40 km de altitude, numa atmosfera residual correspondente a 0,01% da atmosfera na superfície terrestre. A técnica utilizada para obter as imagens em raios X e gama é conhecida como **más**cara **co**dificada, daí o nome do projeto, que se originou das primeiras sílabas das palavras que formam o nome da técnica de imageamento utilizada neste instrumento. O MASCO foi o primeiro experimento astronômico brasileiro embarcado. Essas pesquisas [5] continuam com o projeto do satélite MIRAX (Monitor e Imageador de Raios X) e seu protótipo em balão protoMIRAX (Figura 6).

Figura 6: O telescópio imageador de raios X protoMIRAX.

O programa de satélites científicos do INPE, iniciado nos finais do anos 1990, prevê o desenvolvimento de três satélites científicos, dedicados às áreas de Geomagnetismo, Aeronomia, e Astrofísica. O conceito de uma câmara imageadora de raios-X foi selecionado para ser o principal experimento do satélite astrofísico desse programa. O experimento é um monitor e imageador de raios X duros (MIRAX), constituído basicamente de um detector de última geração composto por uma liga de telureto de cádmio e telureto de zinco (CZT).

A massa do instrumento será de aproximadamente 50 kg sendo colocado em órbita equatorial circular a 750 km de altitude. O principal objetivo científico da missão é realizar um monitoramento contínuo de uma ampla região contendo o Centro Galáctico e suas vizinhanças. Isso proporcionará um estudo detalhado de fontes transientes de raios X, além de estudos de microquasares, pulsares de acréscimo, buracos negros estelares, explosões de radiação-gama, entre outros objetos e fenômenos. Estão previstos dois lançamentos de balões estratosféricos, provavelmente em 2016, para testar conceitos e subsistemas que serão usados no satélite MIRAX. As missões de desenvolvimento, em balões estratosféricos, são chamadas de experimentos proto-MIRAX.

12.4. CONCLUSÃO

Os pesquisadores da DIDAS têm contribuído para o avanço da Astrofísica em termos mundiais. Várias descobertas foram feitas graças às pesquisas realizadas no INPE. Essas contribuições incluem todas as áreas de pesquisa citadas ao longo deste texto. Em termos de avanços na área de instrumentação, vários sistemas foram desenvolvidos em todos os campos de atuação dos pesquisadores do INPE. Em particular, as pesquisas em instrumentação astronômica, realizadas pelo INPE, são responsáveis pela quase totalidade da produção nacional da área. As pesquisas realizadas pela DIDAS contribuem também para a formação de pessoas altamente qualificadas que são incorporadas aos vários segmentos produtivos brasileiros, seja da área técnico-científica ou de áreas correlatas, o que garante um retorno altamente importante para a sociedade brasileira.

12.5. BIBLIOGRAFIA

[1] Villela Neto, T., Pesquisas em astrofísica no INPE, publicação interna do INPE (INPE-7177-PUD/38), São José dos Campos, 2003.

[2] Wuensche, C.A. & Rodrigues, C.V., Pesquisa em astrofísica no INPE, publicação interna do INPE, São José dos Campos, 2004.

[3] Caminhos para o Espaço, editora Contexto, organização por F. de Oliveira, 1991.

[4] Portal WeB da Divisão de Astrofísica do INPE – http://www.das.inpe.br

[5] Braga, J., Astronomia Espacial. Em: História da Astronomia Brasileira, Oscar Matsuura (Org.), Companhia Editora de Pernambuco, v. II, pp. 550-578, 2014.